МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ИНФОРМАТИЗАЦИИ

МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ИННОВАЦИОННЫХ
И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЯЗАНСКОЙ ОБЛАСТИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

СТНО-2017

II МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ И НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

Сборник трудов

Том 4

Рязань 2017

УДК 004 + 001.1 + 681.2+ 681.2+ 681.3+681.5
С568

Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2017 [текст]: сб. тр. II междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 8 т. Т.4./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2017; Рязань. – 288 с.

Сборник включает труды участников II Международной научно-технической и научно-методической конференции «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2017. Освещаются вопросы математического моделирования, новых технологий в радиоэлектронике, телекоммуникации, измерительной технике и системах, биомедицинских технологиях, вычислительных сетях, САПР, машиностроительном и нефтехимическом производстве, в образовании, экономике, гуманитарной сфере и космических технологиях.

Авторская позиция и стилистические особенности сохранены.

ISBN 978-5-7722-0293-7

СЕКЦИЯ «ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

УДК 004.94; ГРНТИ 50.41.25

РЕАЛИЗАЦИЯ КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ ПОСРЕДСТВОМ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ ЛИЦА

О.И. Вахрушев, К.А. Майков

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Россия, Москва, olegvakhr@gmail.com

Аннотация. Рассматриваются особенности реализации комбинированного метода для решения задачи трехмерной идентификации при минимальных требованиях к аппаратному обеспечению системы. Предлагается модификация метода ASM для повышения его быстродействия на видеопотоке.

Ключевые слова: идентификация личности, 3D-распознавание, геометрия лица, восстановление трехмерной структуры

IMPLEMENTATION OF COMBINED IDENTIFICATION METHOD BY FACE STRUCTURE ANALISYS

O.I. Vakhrushev, K.A. Maikov

Bauman MSTU,
Moscow,Russia

Abstract. Implementation of combined identification method with low hardware requirements is considered.ASM method modificationis provided for performance enhancement at video stream.

Keywords: identification, 3D-recognition, face-geometry, 3D-reconstruction

При разработке систем с ограниченным доступом возникает задача идентификации пользователей. Как показано в [1], биометрические методы идентификации, анализирующие структуру лица, являются наиболее простыми в использовании, а также позволяют производить идентификацию без применения специализированного оборудования. Известные методы идентификации личности посредством анализа структуры лица могут быть разделены на две категории. К первой относятся решения, использующие двумерный анализ изображений, ко второй – анализирующие трехмерную структуру лица.

Результаты обзора функциональных особенностей методов данных групп приведены в [2], где обоснована необходимость построения комбинированного метода и рассмотрены его функционально-структурные особенности. Основной концепцией предлагаемого решения является комбинация двумерного и трехмерного анализа структуры лица при обработке поступающих из видеопотока кадров. Укрупненная алгоритмическая структура метода включает три основных этапа: локализацию характеристических точек (ХТ) на изображении лица, восстановление их трехмерных координат, идентификацию по полученным данным.

Для локализации ХТ применяется метод активных моделей формы (Active Shape Models, ASM) [3], а положение модели ASM устанавливается методом Виолы-Джонса [4] и отслеживанием смещения (трекингом) набора особенностей. При построении комбинированного метода использовалась реализация ASM, предложенная в [3], а для обучения была применена база LFPW [5], содержащая выборку из 811 размеченных изображений лиц.

Так как комбинированный метод используется на видеопотоке, была введена модификация метода ASM, при которой первый его этап дополняется предварительным трекингом ХТ, что позволяет снизить количество итераций.

Для решения задачи трехмерной реконструкции используется метод прямого линейного преобразования (Direct Linear Transformation, DLT) [6]. Итеративное применение данного метода позволяет осуществлять восстановление трехмерных координат ХТ по паре последовательных кадров видеопотока, корректируя значения, полученные на предыдущих итерациях. Используются точки модели ASM начиная с 18, так как первые 17 образуют контур лица.

После реконструкции трехмерных координат ХТ на очередном кадре к ним применяется прокрустов анализ для устранения различий в наклоне, смещении и масштабе.

Для оценки быстродействия метода была осуществлена серия из 100 экспериментов, в ходе которых было получено усредненное значение 0.1273 секунды для обработки одного кадра видеопотока, что обеспечивает до восьми кадров в секунду.

Этап идентификации заключается в сравнении дескриптора лица, сформированного для текущего сеанса с имеющимися в базе данных. В качестве дескриптора используется взвешенный набор характеристических точек. Весовые коэффициенты являются мерой устойчивости точек при наличии эмоций на лице.

Для определения данных коэффициентов был, осуществлен вычислительный эксперимент, для анализа набора размеченных изображений лиц с различными эмоциями. Была произведена оценка дисперсий координат ХТ. Весовой коэффициент *i*-й точки вычисляется как $w_i = 1 - (d_i - \min(D))$, где D – вектор дисперсий координат ХТ.

Для каждого дескриптора в базе данных хранится информация о человеке. Таким образом задача идентификации сводится к выбору из базы данных наиболее подходящего дескриптора лица. Выбирается такой дескриптор d_k, чтобы выполнялось условие $s_{0k} = \min(S)$, где S – матрица расстояний между дескрипторами, а s_{0k} – расстояние от сформированного дескриптора до k-го. При этом расстояние между дескрипторами *m* и *k* определим как:

$$s_{mk} = \sum_{i=1}^{N} \left(w_i \left| p_{im} - p_{ik} \right| \right),$$

где N – количество ХТ в дескрипторе,

w_i – весовой коэффициент *i*-й точки,

p_{ij} – координаты *i*-й точки *j*-го дескриптора.

Таким образом, разработанный метод позволяет производить идентификацию личности, при наличии одного устройства видеозахвата, обеспечивая при этом обработку до восьми кадров в секунду.

Библиографический список

1. Вахрушев О.И., Майков К.А. // Современные технологии в науке и образовании. Сборник докладов международной научно-технической и научно-методической конференции. РГРТУ, 2016, т.3, С.111-114.
2. Вахрушев О.И., Майков К.А. //Виртуальная и дополненная реальность-2016: состояние и перспективы. Сборник научно-методических материалов, докладов и статей Всероссийской конференции молодых ученых. ГБПОУ Московский государственный образовательный комплекс, М., 2016, С.77-80.
3. G. Tzimiropoulos, M. Pantic. Optimization problems for fast AAM fitting in-the-Wild, IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2013.
4. P. Viola and M.J. Jones. Rapid Object Detection using a Boosted Cascade ofFeatures. Dept. The Ohio State University, Columbus, 2001.
5. P. Belhumeur, D. Jacobs, D. Kriegman, N. Kumar. Localizing Parts of Faces Using a Consensus of Exemplars, Proceedings of the 24th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011.
6. R. Hartley, A. Zisserman. Multiple View Geometry in Computer Vision. Second Edition. Ca

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ НА ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

А.Б. Фельдман, Д.Ю. Ерохин
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань
Erokhin.d.y @gmail.com

Аннотация. В данной работе представлен нейросетевой подход к задаче обнаружения и распознавания объектов на видеоизображениях. Описана типовая структура сверточной нейронной сети. Представлен алгоритм, способный работать в реальном масштабе времени с частотой до сорока кадров в секунду.

Ключевые слова: нейронные сети, обработка изображений, распознавание образов, обнаружение

LOCALIZATION OF OBJECTS ON THE VIDEO BY USING ARTIFICIAL NRURAL NETWORK

A. Feldman, D. Erokhin
Ryazan state radio engineering university,
Ryazan, Erokhin.d.y @gmail.com

Abstract. This paper presents a neural network approach to solve the problem of the detection and recognition of objects in the video. The typical structure of the convolution neural network was also described in this paper. The presented algorithm is able to work in real time with a frequency up to 40 frames per second.

Keywords: neural network, image processing, pattern recognition, detection

Анализ последних тенденций показывает, что существенно возрастает интерес к различным системам технического зрения. Особое внимание уделяется системам, которые способны обнаруживать заданные классы объектов на фото и видеоизображениях. В последнее время все чаще для это используются системы, в основе которых лежат искусственные нейронные сети. Это связано как с большим прогрессом вычислительной техники, особенно в области графических процессоров, который произошел в последнее десятилетие, так и с широким кругом задач, которые можно решать с их помощью.

Современные нейросетевые системы технического зрения в качестве блока обработки информации зачастую используют видеокарту. Это связанно с возможность массивного распараллеливания операций. Использование видеокарты вместо центрального процессора позволяет в десятки раз сократить время, требуемое для обработки информации.

Новейшие нейросетевые алгоритмы способны не только распознавать изображение объекта, но и определять его местоположение в кадре, как представлено на рисунке 1:

Рис. 1. Результат выделения объектов на изображении

Рассмотрим типовую сверточную нейронную сеть. В общем случае сверточная нейронная сеть состоит из трех типов слоев – сверточный, субдискретизирующий и полносвяный слой [1]. Рассмотрим каждый из слоев подробно.

Сверточные слои предназначены для формирования карт признаков. Свое название они получили от операции свертки. Данная операция достаточно часто используется в задачах обработки изображений. Двумерная свертка описывается следующей формулой:

$$B[m,n] = \sum_{i,j} f[m-i, n-j] g[i,j];$$

где f – исходное изображение, g – ядро фильтра. Как правило карты признаков, полученные в результате свертки, поступают на нелинейную функцию активации. В качестве такой функции может выступать усеченное линейное преобразование:

$$f(x) = \begin{cases} x, x \geq 0; \\ 0, x < 0. \end{cases}$$

Данная операция необходима для фильтрации избыточной информации в картах признаков. Основными преимуществами использования усеченного линейного преобразования вместо использования сигмоидальной функции активации являются более быстрая сходимость на этапе обучения [2] и более низкие затраты вычислительных ресурсов.

Полученные на предыдущем этапе карты признаков подаются на субдескритизирующий слой. Данный слой уменьшает пространственные размеры карт признаков, но сохраняет наиболее значимою информацию. Для составления прореженной карты признаков могут использоваться различные функции, однако наиболее часто используются следующие операции: выбор максимального значения в заданной области (Max pooling), среднее (Average pooling) или же сумма (Sum).

В случае Max Pooling мы задаем окно (например, 2x2 со смещением ядра, равным 2) и переносим на результирующее изображение только максимальный элемент заданной области. На рисунке 2 представлен пример операции Max Pooling:

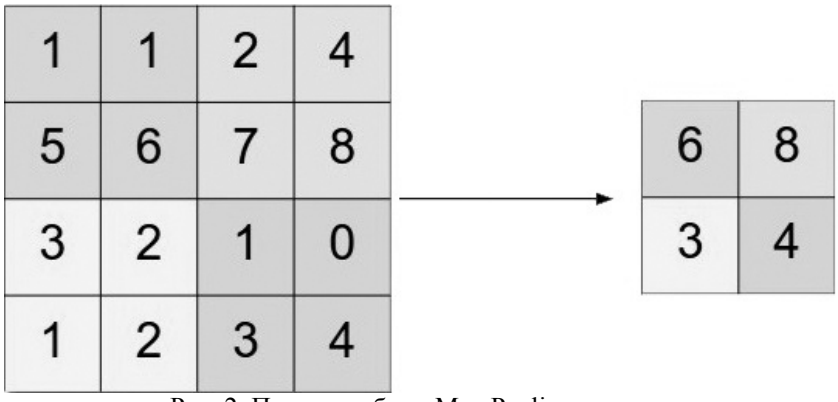


Рис. 2. Пример работы Max Pooling

На заключительном этапе работы данные поступают на один или несколько полносвязных слоев. Слой называется полносвязным, если каждый нейрон предыдущего слоя соединен со всеми нейронами следующего слоя. Следует отметить что на данном этапе сеть теряет возможность пространственной локализации объектов на изображении. Задачей этого участка сети является отнесение изображения к одному из заданных классов. Для этой цели в качестве функции активации используется функция мягкого максимума (Softmax function):

$$L_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_k e^{z_k}};$$

где e^{z_i} – степень принадлежности рассматриваемой области i классу, L_i – оценка вероятности того, что в заданной области находится объект *i-го* класса. Данная функция трансформирует вектор произвольных вещественных чисел к вектору, значения которого лежат в диапазоне от нуля до единицы и в сумме равны единице. В нашем случае мы можем говорить, что

числа полученные в результате применения Softmax function являются оценкой вероятности принадлежности изображения конкретному классу.

Существуют различные подходы к выделению областей интереса: использование скользящего окна на карте характерных особенностей, полученной с использованием сверточной нейронной сети [1], применение выборочного поиска для распознавания объектов [2], [3] и т.д.

Остановимся на рассмотрении идеи, изложенной в [3]. Структура сети приведена на рисунке 3:

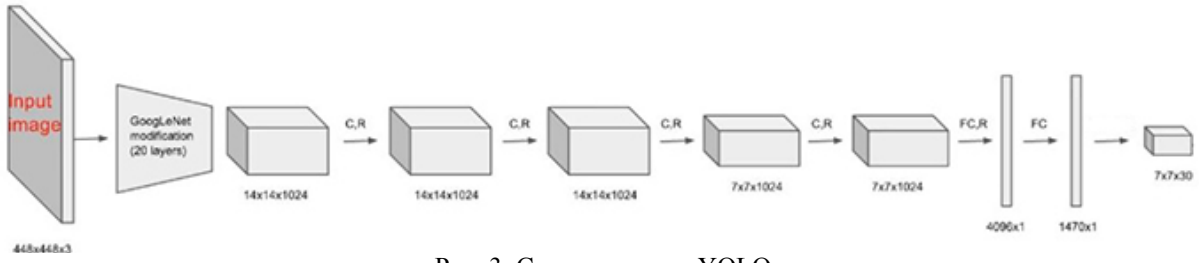


Рис. 3. Структура сети YOLO

Топология сети имеет следующий вид: модифицированная сеть GoogleNet [4], пять дополнительных сверточных слоев, в качестве функции активации используется усеченное линейное преобразование, а также два полносвязных слоя.

Принцип работы сети заключается в следующем: исходное изображение приводится к размеру 448 на 448 пикселей, затем полученное изображение поступает на нейронную сеть. В результате мы получаем тензор с размерами 7x7x(10 + N), где N – число классов. Каждая ячейка размером 1x1x(10 +N) характеризует соответствующую ей область на исходном изображении. Для удобства будем рассматривать ячейку как вектор. Данный вектор состоит из: координат центра, ширины и высоты первого обрамляющего прямоугольника, вероятности что в данной ячейке находится объект. Под обрамляющими прямоугольниками будем понимать выделенные области на изображении, центры которых соответствуют координатам ячеек, число обрамляющих прямоугольников является параметром и задается пользователем. Следующие пять чисел соответствуют второму обрамляющему прямоугольнику. Оставшиеся значения соответствуют уверенности сети в том, что центр объекта лежит в данной ячейке. Анализируя эти значения, мы принимаем решение о том, находится ли в данной области объект или нет.

Для подавления пересекающихся обрамляющих прямоугольников, которые содержат один и тот же класс, используется алгоритм подавления не-максимумов. Суть алгоритма заключается в следующем: для каждого класса выбирается обрамляющий прямоугольник с максимальной степенью принадлежности к данному классу. Затем вычисляется метрика. В нашем случае – это отношение пересечения к объединению площади для всех оставшихся прямоугольников. Если значение вычисленной метрики больше заданного порога, то рассматриваемый прямоугольник исключается. Результат работы приведен на рисунке 4:

Рис. 4. Результат работы рассматриваемой нейронной сети

Были проведены экспериментальные исследования. В качестве тестового компьютера использовалась рабочая станция со следующими характеристиками: процессор intel core i5-4590, графическая карта nvidia gtx 970 4gb. Эксперименты показали, что нейронная сеть с

такой структурой способна обрабатывать поступающий видеопоток с частотой до 40 кадров в секунду.

Обучение сети проводилось на собственном наборе данных, который содержит 5 классов. Результаты показали, что средняя точность обнаружения объекта составляет приблизительно 70%.

Работа выполнена при использовании гранта для государственной поддержки ведущих научных школ НШ-7116.2016.8.

Библиографический список

1. LeCun Y., Bengio Y. Convolutional networks for images, speech, and time series //The handbook of brain theory and neural networks. – 1995. – Т. 3361. – №. 10. – С. 1995.
2. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks //Advances in neural information processing systems. – 2012. – С. 1097-1105.
3. Redmon J. et al. You only look once: Unified, real-time object detection //Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2016. – С. 779-788.
4. Szegedy C. et al. Going deeper with convolutions //Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2015. – С. 1-9.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ОБЪЕКТАМИ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

М.А. Савкин
Рязанский государственный радиотехнечиский университет,
Россия, Рязань, maks.sawckin@yandex.ru

Аннотация. Производится сравнение различных алгоритмов слежения за объектами в последовательности изображений, основанных на разных подходах оценки параметров геометрических преобразований.

Ключевые слова: изображение, видео, слежение, взаимнокорреляционная функция, преобразование Фурье

COMPARATIVE ANALYSIS OF CORRELATION BASED VISUAL OBJECT TRACKING ALGORITHMS

M. Savkin, A. Feldman
Ryazan state radioengineering university,
Russia, Ryazan region, Ryazan, maks.sawckin@yandex.ru

Abstract. In the paper the comparison of various correlation based algorithms for tracking object in image sequences is described. The set of different methods for image registration is explored.

Keywords: image, video, tracking, cross-correlation, Fourier transform

1. Введение

Задача слежения за объектами в последовательности изображений (видеопоследовательности) возникает во многих областях современной науки и техники: в задачах исследования микроорганизмов, в различных охранных системах, в приложениях, связанных с военной техникой, например, при создании беспилотных аппаратов, и т. д. Многие из этих приложений связаны с работой по отслеживанию объектов в реальном времени. Таким образом, для этих приложений требуется реализация не только надежного в плане получаемого конечного решения задачи слежения алгоритма, но также обладающего достаточно малыми вычислительными затратами, такими, чтобы была возможна работа в реальном масштабе времени. При этом для многих приложений требование минимизации вычислительных затрат алгоритма является не менее важным, чем качество даваемого им решения задачи слежения.

В данной работе были произведены программная реализация и сравнение (на основе качества получаемых результатов и времени работы) алгоритмов слежения за объектами на видеопоследовательности, основанных на различных подходах к оценке параметров геометрических преобразований изображений: классическом корреляционном алгоритме, корреля-

ционном алгоритме с нормированной функцией, разностном алгоритме и фазовой корреляции. При этом были осуществлены две реализации классического корреляционного алгоритма и две реализации корреляционного алгоритма с нормированной функцией: в первом варианте реализаций требуемые вычисления производятся в пространственной области, во втором – в частотной (переход в которую и обратно – в пространственную область – осуществляется соответственно при помощи прямого и обратного дискретных преобразований Фурье). Программа, реализующая алгоритмы слежения, была создана с использованием языка программирования C++ и библиотеки машинного зрения OpenCV в среде программирования Microsoft Visual Studio 2013.

2. Алгоритмы оценки смещения объекта

Задачу оценки параметров смещения в контексте проблемы слежения за объектами можно сформулировать следующим образом. Пусть известно эталонное изображение (изображение отслеживаемого объекта) $h(i,j)$, $(i,j)\in H$, которое является частью наблюдаемого изображения (или области интереса, т.е. той части кадра видеопоследовательности, для которой будет производиться оценка параметров смещения изображения объекта) $l(i,j)$, $(i,j)\in L$. Предположим, что центр эталонного изображения смещен относительно центра изображения $l(i,j)$ на известный вектор (α,β). Тогда связь между $h(i,j)$ и $l(i,j)$ можно описать выражением [1]:

$$l(i,j)=h(i-\alpha,j-\beta)\text{, при } (i-\alpha,j-\beta)\in H. \quad (1)$$

1. Классический корреляционный алгоритм

В соответствии с классическим корреляционным алгоритмом для поиска параметров (α,β) необходимо вычислить взаимную корреляционную функцию наблюдаемого изображения и эталонного изображения:

$$F(\alpha,\beta)=\sum_{(i,j)\in H} h(i,j)\,l(i+\alpha,j+\beta),\quad (\alpha,\beta)\in L. \quad (2)$$

Значения (α^*,β^*), при которых достигается глобальный максимум выражения (2), принимаются в качестве величин, характеризующих смещение эталона вдоль осей координат [1]:

$$(\alpha^*,\beta^*)=\arg\max\left\{F(\alpha,\beta)\right\}. \quad (3)$$

2. Нормированные функции

При наличии неоднородного фонового изображения алгоритм, использующий вычисление максимума взаимной корреляционной функции, может давать грубые ошибки, если, например, яркость некоторых участков фона окажется выше, чем яркость эталона. Чтобы избежать этого, могут быть использованы нормированные функции, например:

$$F(\alpha,\beta)=\frac{\sum_{(i,j)\in H} h(i,j)\,l(i+\alpha,j+\beta)}{\sqrt{\sum_{(i,j)\in H} h^2(i,j)}\sqrt{\sum_{(i,j)\in H} l^2(i+\alpha,j+\beta)}}. \quad (4)$$

Достоинством нормированных функций является уменьшение влияния колебаний яркости изображения на точность определения координат. К недостатку функции вида (4) следует отнести увеличение объема требуемых вычислений [1].

3. Критериальные разностные функции

Для уменьшения объема требуемых вычислений при необходимости работы в телевизионном масштабе времени, используются также критериальные разностные функции вида:

$$F(\alpha,\beta)=\sum_{(i,j)\in H}\left|l(i+\alpha,j+\beta)-h(i,j)\right|, \quad (5)$$

$$F(\alpha,\beta)=\sum_{(i,j)\in H}\left(l(i+\alpha,j+\beta)-h(i,j)\right)^2, \quad (6)$$

для которых необходимо отыскивать глобальный минимум. Преимуществом разностных функций является отсутствие операции умножения. В то же время известно, что точно-

стные характеристики разностных функций при малых отношениях сигнал/шум несколько уступают взаимно корреляционным [1].

4. Использование преобразования Фурье для уменьшения количества вычислительных операций

Для корреляционного алгоритма (как в классическом, так и нормированном вариантах) представляется возможным сократить требуемый объем вычислений, если вычислять взаимную корреляцию с помощью преобразования Фурье. Используя прямое и обратное двумерные дискретные преобразования Фурье (ДПФ), можно вычислить взаимную корреляцию изображений для корреляционных алгоритмов оценки параметров смещения изображений, прибегая к меньшему количеству операций, чем если бы вычисления производились прямым способом. Для этого используется следующая формула [2]:

$$F[h*l]=(F[h])^{*}\cdot(F[l]), \qquad (7)$$

где F - двумерное ДПФ, $(F[h])^{*}$ - комплексно-сопряженные значения преобразования Фурье изображения h, $[h*l]$ - значения взаимнокорреляционной функции изображений h и l. Приведенная формула позволяет найти Фурье-образ взаимнокорреляционной функции. Чтобы в дальнейшем использовать полученный результат для оценки параметров смещения двух изображений, нужно использовать обратное двумерное ДПФ (F^{-1}), чтобы найти сами значения взаимной корреляционной функции:

$$h*l=F^{-1}(F[h*l]). \qquad (8)$$

5. Алгоритм фазовой корреляции

Алгоритм фазовой корреляции может быть использован для оценки параметров преобразований сдвига и поворота изображений. Рассмотрим, как данный алгоритм может быть использован для оценки параметров сдвига (α,β) двух изображений.

Пусть $F[h]$ и $F[l]$ - Фурье-образы изображения эталона и наблюдаемого изображения (области интереса) соответственно. Тогда в соответствии с алгоритмом фазовой корреляции сначала вычисляется взаимная спектральная мощность (R) двух этих изображений:

$$R=\frac{F[l]\cdot(F[h])^{*}}{\left|F[l]\cdot(F[h])^{*}\right|}, \qquad (9)$$

где $*$ - знак комплексного сопряжения. R является, по сути, Фурье-образом взаимнокорреляционной функции, нормированным путем деления на амплитудный спектр изображений h и l. Затем применяется обратное преобразование Фурье для нахождения значений нормированной взаимнокорреляционной функции (r):

$$r=F^{-1}\{R\}. \qquad (10)$$

Значения параметров (α,β), при которых достигается глобальный максимум r, принимаются за оценку параметров сдвига изображений h и l [3]:

$$(\alpha^{*},\beta^{*})=\arg\max\left\{r(\alpha,\beta)\right\}. \qquad (11)$$

3. Алгоритм слежения за объектом

Алгоритм слежения за объектом может быть описан следующим образом:

1) Предоставляется эталонное изображение объекта $h(i,j)$ (например, оно может указываться оператором вручную как участок изображения, наблюдаемого в первом кадре видеопоследовательности, или определяться автоматически каким-либо специализированным алгоритмом). Определяются параметры (размеры, расположение относительно границ кадра) области интереса.

2) Осуществляется поиск предоставленного эталонного изображения $h(i,j)$ в области интереса $l(i,j)$, являющейся участком изображения, наблюдаемого в очередном кадре видеопоследовательности, с параметрами, сформированными на предыдущем шаге алгоритма. Поиск происходит путем оценки параметров сдвига эталонного изображения относительно

области интереса для текущего кадра с использованием одного из описанных подходов. Полученные параметры сдвига (α, β) будут указывать оценку положения объекта относительно области интереса для текущего кадра.

3) Происходит перерасчет параметров области интереса для найденного положения объекта (и возможно, с учетом изменившихся характеристик объекта) в текущем кадре.

4) Осуществляется обновление (адаптация) эталонного изображения $h(i, j)$, так как возможны изменения различных характеристик объекта от кадра к кадру (яркости, размеров, конфигурации и т.д.), которые могут повлиять на качество обнаружения объекта на последующих кадрах.

5) Шаги 2 - 4 алгоритма повторяются для каждого последующего кадра.

4. Тестирование программной реализации алгоритмов

Работа программной реализации всех алгоритмов была протестирована на двух видеосюжетах (на рисунке 1 и рисунке 2 представлены первые кадры каждого из видеосюжетов). При этом учитывалось качество даваемого алгоритмом конечного результата слежения, т. е. соответствие изображения, выданного алгоритмом для последнего кадра видеопоследовательности, эталонному изображению объекта (выделяемому вручную на первом кадре последовательности), который требовалось отслеживать. Степень соответствия определялась исходя из значения среднего геометрического вертикального и горизонтального смещений (в пикселях) найденной позиции объекта в последнем кадре относительно его действительного положения в этом кадре. Также учитывалось среднее время работы алгоритма для одного кадра. Для первой видеопоследовательности размер эталонного изображения составляет 36×38 пикселей, размер области интереса - 90×95 пикселей; для второй видеопоследовательости размер эталонного изображения составляет 28×18 пикселей, размер области интереса - 70×45 пикселей.

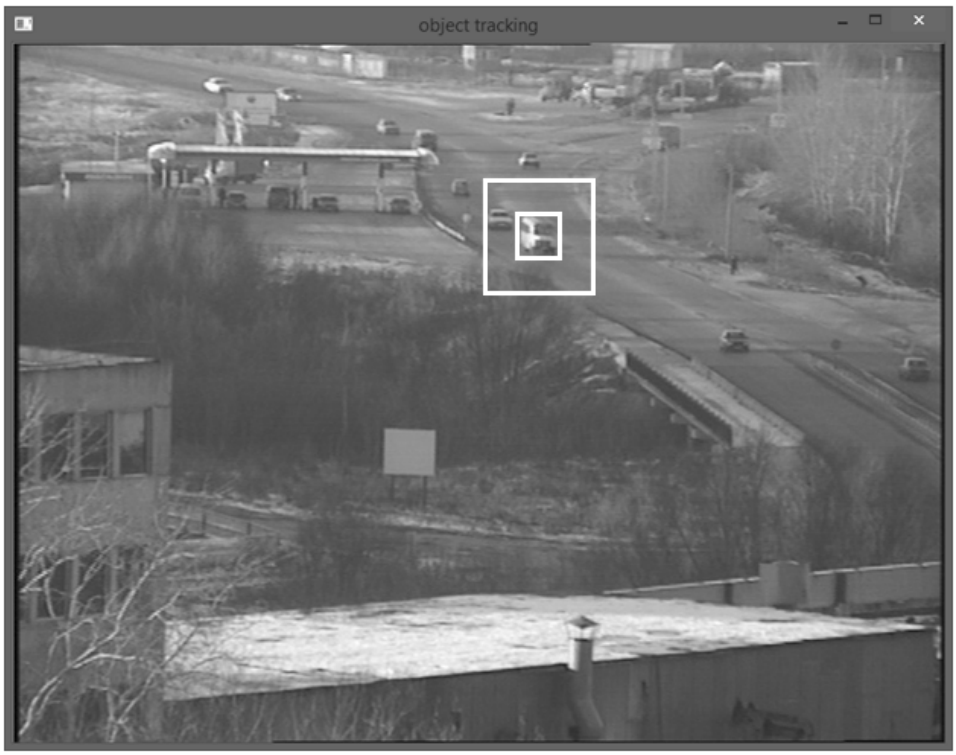


Рис. 1. Первый кадр первой видеопоследовательности с исходным эталонным изображением (малая рамка) и стартовой областью интереса (большая рамка)

Рис. 2. Первый кадр второй видеопоследовательности с выделенными рамками исходным эталонным изображением (малая рамка) и стартовой областью интереса (большая рамка)

Полученные результаты приведены в таблице 1 (для первого видеосюжета) и таблице 2 (для второго видеосюжета). Тестирование производилось на компьютере с 8 ГБ ОЗУ и четырехъядерным процессором Intel Core i7-4702MQ (базовая тактовая частота – 2.20 ГГц, максимальная – 3.20 ГГц) с 6 Мбайт кэш-памяти.

Таблица 1 - Результаты тестирования различных алгоритмов слежения для первой видеопоследовательности (“–” (прочерк) во второй колонке означает наличие срыва слежения)

Алгоритм	Среднее геометрическое вертикального и горизонтального смещений (в пикселях) найденной позиции объекта относительно его действительного положения	Средняя скорость обработки кадров, кадров/с
Классический корреляционный алгоритм	3,6	24,5
Корреляционный алгоритм с нормированной функцией	2	14
Разностный алгоритм (сумма квадратов разностей)	–	21
Разностный алгоритм (сумма модулей разностей)	2	116
Классический корреляционный алгоритм, использующий ДПФ для проведения вычислений	3,6	456
Корреляционный алгоритм с нормированной функцией, использующий ДПФ для проведения вычислений	2	238
Алгоритм фазовой корреляции	2	359

Таблица 2 - Результаты тестирования различных алгоритмов слежения для второй видеопоследовательности (“–” (прочерк) во второй колонке означает наличие срыва слежения)

Алгоритм	Среднее геометрическое вертикального и горизонтального смещений (в пикселях) найденной позиции объекта относительно его действительного положения	Средняя скорость обработки кадров, кадров/с
Классический корреляционный алгоритм	–	123
Корреляционный алгоритм с нормированной функцией	2,2	71
Разностный алгоритм (сумма квадратов разностей)	2,2	81
Разностный алгоритм (сумма модулей разностей)	2,8	235
Классический корреляционный алгоритм, использующий ДПФ для проведения вычислений	–	900
Корреляционный алгоритм с нормированной функцией, использующий ДПФ для проведения вычислений	2.2	463
Алгоритм фазовой корреляции	2. 2	658

Выводы

Сравнение алгоритмов на основе полученных результатов тестирования привело к выводу, что двумя наиболее эффективными подходами для оценивания параметров сдвига изображений при реализации алгоритмов слежения на основе оценки параметров геометрических преобразований являются корреляционный алгоритм с нормированной функцией, реализуемый в спектральной области, и алгоритм фазовой корреляции, т. к. они показали наилучшее качество слежения при том, что время их работы было чуть выше, но очень близко к минимальному времени работы среди всех алгоритмов, протестированных в ходе исследования.

Работа выполнена на средства гранта Президента РФ для государственной поддержки Ведущих научных школ РФ НШ-7116.2016.8 под научным руководством А.Б. Фельдмана.

Библиографический список

1. Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин. «Обработка изображений и управление в системах автоматического сопровождения объектов: учебное пособие» - Рязань, РГРТУ, 2011, 236 с.
2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. Учебник. 3-изд. перераб. дополн. 2000 год. 462 стр.:
3. Reddy B. S., Chatterji B. N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration // IEEE transactions on image processing. – 1996. – V 5. – №.8. – PP. 1266-1271.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

КОРРЕЛЯЦИОННОЕ СОВМЕЩЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТОДОМ МУЛЬТИСТАРТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРОВ

С.И. Елесина, А.В. Савин

Рязанский государственный радиотехнический университет

Аннотация. Рассматривается метод глобальной оптимизации мультистарт при привязке изображений в корреляционно-экстремальной навигационной системе. В качестве локального метода используется метод конфигураций (метод Хука-Дживса). Исследуются последовательная и параллельная версия алгоритма, разработанная с помощью технологий CUDA и OpenCL.

Ключевые слова: глобальный экстремум, целевая функция, мультистарт, метод Хука-Дживса, технология CUDA,технология OpenCL, графический процессор общего назначения, гетерогенная вычислительная система.

CORRELATION IMAGES COMBINING BY MULTISTART METHOD USING GRAPHICS PROCESSOR

S.I. Elesina, A.V. Savin

Ryazan State Radioengineering University

Abstract. The multistart method of global optimization with binding images in an extreme correlation navigation system is considered. Configurations method is used as a local method (Hooke-Jeeves method). We investigate serial and parallel version of the algorithm, developed with CUDA and OpenCL technology.

Keywords: global extrema, the objective function, multistart, Hook-Jeeves method, CUDA technology, OpenCL technology, the GPU for general purpose, heterogeneous computing system.

Необходимость решения задачи корреляционного совмещения возникает во многих областях. Среди них обработка аэрокосмических снимком, навигация летательных аппаратов (ЛА), получение изображений в системах улучшенного и синтезированного видения и т.д. Важную роль, при решении навигационных задач, играют корреляционно-экстремальные навигационные системы (КЭНС). В них осуществляется сравнение эталонных изображений (ЭИ), хранящихся в бортовой базе данных (ББД), с текущим (ТИ), получаемым от систем технического зрения (СТЗ).

Корреляционное совмещение изображений производится с помощью функционала, в качестве которого выступает корреляционная функция. Чтобы получить наилучшее совмещение изображений, необходимо найти глобальный экстремум (ГЭ) целевой функции (ЦФ).

В качестве ЦФ используется нормированная взаимная корреляционная функция [1]:

$$F(x,y)=\frac{\sum_{i}^{M}\sum_{j}^{N}(S_{Э}(i,j)\cdot S_{T}(i-x,j-y))}{\sqrt{\sum_{i}^{M}\sum_{j}^{N}S_{Э}^{2}(i,j)\cdot\sum_{i}^{M}\sum_{j}^{N}S_{T}^{2}(i-x,j-y)}},$$

где $S_{Э}(i,j), S_{T}(i,j)$– яркость эталонного и текущего изображений в точке (i,j); M, N – размеры ЭИ. При совпадении ТИ и ЭИ корреляционная функция достигает максимального значения.

Самым простым методом поиска ГЭ является метод полного перебора, однако этот метод является самым трудоемким.

Одним из вариантов повышения быстродействия является использование метода мультистарт и локального метода оптимизации. Алгоритм метода мультистарт заключается в следующем: вначале случайным образом выбирается точка с координатами (x,y), затем из выбранной точки осуществляется спуск в точку локального минимума. Процесс повторяется до тех пор, пока не удастся найти координаты локального экстремума со значением функции меньше или больше всех предыдущих [1]. В данной статье рассматривается метод конфигураций (метод Хука-Дживса) как один из методов локальной оптимизации, эффективность которого отображена в [2].

Другой вариант – использование преимуществ гетерогенной вычислительной системы. Современные графические процессоры (ГП), как потенциальный элемент гетерогенной системы, благодаря специализированной конвейерной архитектуре, намного эффективнее подходят для обработки графической информации, чем центральный процессор. Для реализации вычислений на ГП существует несколько технологий, среди которых можно выделить технологии OpenCL и NVIDIA CUDA.

OpenCL – это платформа, разработанная для написания программ, связанных с параллельными вычислениями Стандарт OpenCL предоставляет унифицированную платформу для работы с вычислительными устройствами в системе независимо от их архитектуры. Стандарт OpenCLподдерживается множеством вендоров устройств таких как NVDIA, AMD, Intel и т.д. Для написания программ наOpenCLиспользуется язык программировнаия C99 с дополнительными расширениями[3].

NVIDIA CUDA – это платформа для параллельных вычислений общего назначения, разрабатываемая и поддерживаемая компанией NVIDIA. Основным недостатком данной платформы является ее закрытость и ориентированность только на ГП компании NVIDIA. Однако, технология CUDA предоставляет Runtime API, который позволяет скомпилировать программу для ГП заранее, так как известна платформа, на которой будет выполняться программа (ГП от NVIDIA). В отличии от этого, технология OpenCLкомпилирует исходный код перед его выполнением используя Driver API, который предоставляет конкретный производитель устройства, при каждом запуске программы, таким образом обеспечивается переносимость программ, разработанных с помощью технологии OpenCL.CUDA позволяет разработчикам использовать язык программирования Си, однако для взаимодействия с CUDA можно использовать и другие средства и языки программирования [4].

В данной работе проводится исследование и сравнение реализаций алгоритмов мультистарт и алгоритма полного перебора с использованием технологий CUDAи OpenCL, а также последовательной версии алгоритмов. В качестве характеристик сравнения выбраны количество вызовов расчета ЦФ, а также время, затраченное на расчет.

Исследования производились для ТИ размером 260x260 пикселов и для ЭИ разных размеров, а именно 87x87 пикселов (33% от размера ТИ) и 130x130 пикселов (50% от размера ТИ). Для каждого размера ЭИ проводился ряд экспериментов на различном устройстве (ЦП и ГП) и различного количества бросков (5, 10, 25, 50, 100, 150, 200).

На первом этапе исследований было определено количество вызовов процедуры расчета ЦФ для методов мультистарт и полного перебора, а также время, затраченное на вычисления. Так как для метода полного перебора количество вызовов процедуры расчета ЦФ одинаково, при одних и тех же характеристиках ЭИ, и равно $(W_{\text{ТИ}} - W_{\text{ЭИ}}) * (H_{\text{ТИ}} - H_{\text{ЭИ}})$, где $W_{\text{ТИ}}, W_{\text{ЭИ}}$ – ширина ТИ и ЭИ, $H_{\text{ТИ}}, H_{\text{ЭИ}}$) – высота ТИ и ЭИ, а время расчетов включает в себя весь процесс перебора, поэтому для сравнения метода полного перебора и мультистарт, последний исследовался при совершении максимального количества бросков (200). Результаты первого этапа исследований, для алгоритмов с использованием технологии CUDA, приведены в таблице 1. Результаты для реализаций с использованием технологии OpenCL приведены в таблице 2.

Таблица 1 - Сравнение трудоемкости методов полного перебора и мультистарт с использованием технологии CUDA (ПП – метод полного перебора, М – метод мультистарт)

Устройство	ЦП				ГП			
Размер ЭИ от ТИ	33%		50%		33%		50%	
Метод	ПП	М	ПП	М	ПП	М	ПП	М
Количество вызовов процедуры вычисления ЦФ	30276	12905	17161	11276	30276	12028	17161	10590
Затраченное время, сек	138,5	79,3	139,4	125,9	0,15	0,7	0,16	2,17

Таблица 2 - Сравнение трудоемкости методов полного перебора и мультистарт с использованием технологии OpenCL (ПП – метод полного перебора, М – метод мультистарт)

Устройство	ЦПУ				ГПУ			
Размер ЭИ от ТИ	33%		50%		33%		50%	
Метод	ПП	М	ПП	М	ПП	М	ПП	М
Количество вызовов ЦФ	30276	12905	17161	11276	30276	12557	17161	11169
Затраченное время, сек	138,5	79,3	139,4	125,9	0,16	0,4	0,17	0,71

Анализ результатов, приведенных в таблице, явно демонстрирует большой разрыв между количеством вызовов процедуры вычисления ЦФ в методе полного перебора и мультистарт, также большой разрыв между временем работы методов на ЦП и ГП. Это говорит о несомненном преимуществе использования параллельных вычислений перед последовательными. Также результаты показывают, что работа метода полного перебора на ГП занимает меньше времени, чем работа метода мультистарт. Такую ситуацию можно объяснить сложностью алгоритма Хука-Дживса, используемого в качестве метода локальной оптимизации, по сравнению с алгоритмом полного перебора. Если сравнивать реализации с использованием разных технологий (CUDA, OpenCL), то по результатам видно, что нет явного перевеса со стороны той или иной технологии.

На втором этапе экспериментов было подробно исследовано время работы (зависимость времени вычислений от количества бросков) метода мультистарт на ЦП и ГП. На рисунке 1 представлены зависимости времени выполнения расчетов от количества совершенных бросков при корреляционном совмещении изображений с использованием метода мультистарт и метода локальной оптимизации Хука-Дживса на ЦПУ и ГПУ с использованием технологии CUDA и с использованием технологии OpenCL для ЭИ, составляющего 50% от размера ТИ.

а) б) в)

Рис. 1. Зависимости времени выполнения расчетов от количества бросков для ЭИ (50% от ТИ)
а) на ЦП; б) на ГПс использованием технологии OpenCL; в) на ГП с использованием технологии CUDA

С учетом проведенных исследований можно сделать вывод, что использование параллельных вычислений (а именно реализации алгоритмов на ГПУ) дает ощутимый выигрыш по времени выполнения вычислений при решении задачи корреляционного совмещения изображений. В свою очередь, результаты использования обеих технологий близки друг к другу, что не дает возможности однозначно определить подходящую для решения данной задачи.

Библиографический список

1. Елесина С.И., Костяшкин Л.Н., Логинов А.А., Никифоров М.Б. Совмещение изображений в корреляционно-экстремальных навигационных системах. Монография / Под ред. Л.Н. Костяшкина, М.Б. Никифорова. М.: Радиотехника, 2015. 208 с.
2. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах: учеб. пособие. М.: Высшая школа. 2002. 544 с.
3. Елесина С.И. Корреляционное совмещение изображений методом мультистарт с использованием технологии OPENCL [Текст] / С.И. Елесина, А.В. Савин // Методы и средства обработки и хранения информации: межвузовский сборник научных трудов /Под ред. Б.В. Кострова. – М.: Курс, 2015. – С. 109-113.
4. Дж. Сандерс, Э. Кэндрот Технология куда в примерах. Введение в программирование графических процессоров. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 232 с

УДК 629.7.058.76; ГРНТИ 89.25.21

СИСТЕМА ОПОРОЖНЕНИЯ БАКОВ И СИНХРОНИЗАЦИИ В ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Д.С. Ершов
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, ershov.d.s@mail.ru

Аннотация. В данной работе приведены основные характерные особенности ракетных двигателей, рассматривается устройство и работа камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя. Описывается аппаратура системы опорожнения баков и синхронизации.

Ключевые слова: ракетный двигатель, камера сгорания, опорожнение баков, управление тягой, синхронизация расхода топлива.

SYSTEM OF EMPTYING TANKS AND SYNCHRONIZATION IN LIQUID ROCKET ENGINES

D. S. Ershov
Ryazan state radio engineering University,
Russia, Ryazan, ershov.d.s@mail.ru

Abstract. In this paper, describe the basic characteristics of rocket engines, discusses the design and operation of combustion chamber of liquid rocket engine. Describes the system equipment, emptying tanks and synchronization.

Keywords: rocket engine, combustion chamber, emptying tanks, draft control, sync, fuel consumption.

Ракетным двигателем (РД) называют двигатель на реактивной тяге, не использующий для своей работы энергию из окружающей среды. Таким образом, РД – это устройство, имеющее источник энергии и запас рабочего тела (топлива) и предназначенное для получения тяги путем преобразования энергии в кинетическую энергию рабочего тела, выбрасываемого от двигателя в окружающую среду.

РД обладают тремя основными характерными особенностями:

1) автономность от окружающей среды. Под автономностью следует понимать способность ракетного двигателя работать без использования энергии из окружающей среды. В связи с этим, данный тип двигателей может работать в безвоздушном пространстве и под водой;

2) независимость тяги от скорости движения летательного аппарата, т.к. тяга создается за счет расхода запасов рабочего тела и энергии, имеющихся на борту. Поэтому эти двигатели способны функционировать при больших скоростях движения.

3) высокая концентрация энергии на единицу массы рабочего тела, обусловленная стремлением получить максимальную скорость истечения реактивной струи, и, следовательно, большая энергонапряженность рабочего процесса и малая удельная масса двигателя, приходящаяся на единицу развиваемой тяги.

В большинстве практически применяемых в настоящее время ракетных двигателях используется химическая энергия, носителем которой является топливо. Наиболее часто в РД используется двухкомпонентное топливо, состоящее из горючего и окислителя. Источником энергии в этом случае является экзотермическая реакция (реакция горения). Химическая энергия топлива преобразуется в камере сгорания (КС) в тепловую энергию продуктов реакции. Далее тепловая энергия в сопле переходит в кинетическую энергию вытекающих продуктов сгорания (ПС), в результате, образуется реактивная тяга.

Химические РД можно разделить на три основные группы:

1) жидкостные ракетные двигатели (ЖРД);

2) ракетные двигатели твердого топлива (РДТТ);

3) гибридные ракетные двигатели (ГРД), использующие смешанное агрегатное состояние топлива.

Основной элемент жидкостного ракетного двигателя, где создается реактивная тяга, – камера сгорания двигателя. На рисунке 1 приведена схема устройства камеры ЖРД, работающая на двухкомпонентном виде топлива. Она состоит из камеры сгорания 6 и сопла 7, конструктивно представляют собой одно целое. Камера сгорания имеет смесительную го-

ловку 4, на которой размещаются специальные устройства – форсунки 3 и 5, предназначенные для подачи компонентов топлива в КС. Стенки камеры изготавливают, как правило, двойными для создания зазора между внутренней стенкой 2 и наружной силовой рубашкой 1. По зазору протекает компонент или компоненты топлива, благодаря чему происходит охлаждение КС.

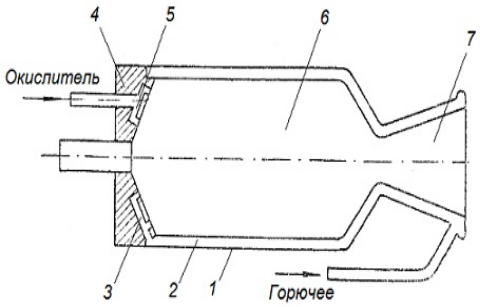


Рис. 1. Схема камеры ЖРД

Рабочий процесс в камере ЖРД можно представить в следующем виде. Горючее и окислитель впрыскиваются под давлением в камеру сгорания через форсунки, дробятся на мелкие капли, перемешиваются, испаряются и воспламеняются. Воспламенение топлива может осуществляться химическими, пиротехническими и электрическими средствами.

Топливо после воспламенения горит при высоком давление (15—20 МПа). При горении топлива образуются газообразные продукты сгорания, нагретые до высоких температур (3000—4500 К), которые выбрасываются из камеры сгорания в окружающую среду через сопло. По мере движения продуктов сгорания по соплу их температура и давление уменьшаются, а скорость возрастает, переходя через скорости звука в минимальном (критическом) сечении сопла. На выходе из сопла скорость истечения продуктов сгорания достигает 2700—4500 м/с.

В общем же случае ЖРД состоит из нескольких КС, систем регулирования и подачи компонентов топлива, исполнительных устройств для создания управляющих моментов, соединительных магистралей и т.д. Система регулирования осуществляет автоматическое поддержание или программированное изменение параметров в камере для обеспечения заданных величин тяги, определенного соотношения компонентов, устойчивой работы КС, а также управляет переходными процессами, например запуском и остановкой двигателя. Для данных целей в жидкостных ракетных двигателях применяется система опорожнения баков и синхронизации (СОБИС).

СОБИС предназначена для обеспечения правильного расхода горючего и окислителя, для нормальной работы двигателей и одновременного опорожнения баков компонентов топлива первой ступени ракетоносителя к моменту её отделения.

Аппаратура СОБИС состоит из шести (в зависимости от числа двигательных установок) систем автоматического регулирования. Пять из них (по числу двигательных установок) представляют собой идентичные системы одновременного опорожнения баков (СОБ) единичной двигательной установки.

СОБ является регулятором соотношения мгновенных объемов расходов горючего и окислителя, которая поддерживает это соотношение в определенном допустимом интервале. В конечном счете, обеспечивается одновременное опорожнение баков каждой двигательной установки при допустимых отклонениях соотношения компонентов от номинального.

Шестая система регулирования (система межблочной синхронизации) обеспечивает синхронизацию расходов компонентов топлива четырёх боковых двигательных установок между собой и относительно центральной.

Одновременность опорожнения баков ступени и точность синхронизации работы пяти двигателей критически важны для увеличения максимальной полезной нагрузки и обеспече-

ния параметров орбиты выведения. Аппаратура СОБИС управляет режимом работы турбонасосных агрегатов, подающих компоненты топлива в двигательные установки.

Бортовая аппаратура СОБИС первой ступени состоит из четвёрки приборов УМ-50И, УМ-52И, УМ-40АИ и ТДТ-И на каждой боковой двигательной установке (БДУ).

Приборы УМ-50И представляют собой основные вычислительные приборы системы на каждой БДУ. Они определяют необходимое соотношение компонентов и управляют дроссельным вентилем горючего. Информация о текущем расходе и о рассогласовании уровней поступает на приборы УМ-50И от датчиков расхода компонентов и от приборов УМ-52И.

Приборы УМ-52И являются сравнительными уровнемерами. Они одновременно измеряют положение уровней горючего и окислителя в баках во время работы двигателя с точностью около 1мм и выдают сигналы рассогласования уровней в опорных точках на приборы УМ-50И и УМ-40АИ для дальнейшей обработки.

Усилители-преобразователи системы синхронизации уровней окислителя УМ-40АИ представляют собой устройства, предназначенные для преобразования временных сигналов рассогласования уровней окислителя центральной и боковых двигательных установок в командные токовые сигналы, управляющие режимами работы турбонасосных агрегатов.

Телеметрический датчик тока ТДТ-И предназначен для усиления и преобразования сигнала синхронизации или сигнала тока электродвигателя исполнительного механизма в сигналы, пригодные для передачи по радиоканалу с целью телеметрического контроля работы системы.

Таким образом, аппаратура СОБИС является неотъемлемой частью управления ракетного двигателя. От точности измерения и скорости передачи измерительной информации и управляющего сигнала зависит качество полета летательного аппарата, поэтому к данной аппаратуре предъявляются жесткие требования.

УДК 621.383.8; ГРНТИ 76.13.23

СОВМЕЩЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ И ФРАГМЕНТИРОВАННЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

А.Н. Ветров, Ч.К. Мутумбиша
Тамбовский государственный технический университет
Россия, Тамбов, avetrov@yandex.ru, *chonomutumbisha@yahoo.com*

Аннотация. В данной статье предложена методика совмещения рентгеновских и тепловых изображений при медицинской диагностике заболеваний различного характера. Это повышает информативность диагностики, что обеспечивает большую достоверность диагноза. В статье проведен анализ методов совмещения изображений. Предложен принципиально новый метод совмещения изображений. Представлены результаты обработки в программной среде Matlabисходных биомедицинских данных.

Ключевые слова: пороговая обработка, рентгеновские изображения, тепловые изображения.

COMBINING X-RAY AND FRAGMENTED INFRARED IMAGES IN MEDICAL DIAGNOSIS

A.N.Vetrov, C.C.Mutumbisha
Tambov State Technical University,
*Russia, Tambov,*avetrov@yandrex.ru, *chonomutumbisha@yahoo.com*

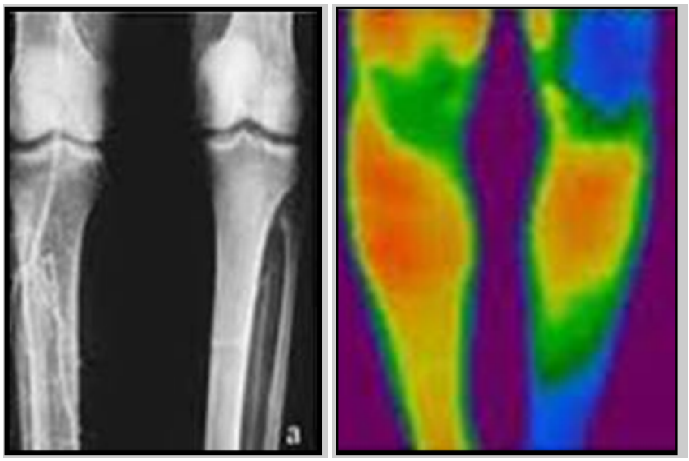
Abstract. In this article the technique of combining the X-ray and thermal imaging in medical diagnosis of diseases of various kinds. This increases the information content of the diagnosis, which provides greater accuracy of diagnosis. The article analyzes the image alignment methods. A principally new method of combining images.Presented results of processing in Matlab software environment biomedical data source.

Keywords: threshold processing, aggregation, X-ray images ,thermal images.

Решение задачи совмещения инфракрасных и рентгеновских изображении является актуальной и перспективной, поскольку это обеспечит повышение информативности результирующего изображения. Рентгеновский снимок не выявляет патологию на ранней стадии её

развития, но позволит уточнить форму исследуемых органов, их положение, состояние рельефа, патологические изменения. Термография исследуемой области позволит определить контуры очага, его интенсивность, а также структуры и области распространения [1]. Но основой будет являться рентгеновское изображение, так как оно показывает изменения в более плотных тканях. Термограмма же дает распределение температур в мягких тканях, мало отличающихся по плотности. Поэтому целесообразно накладывать тепловизионную картину на рентгеновский снимок.

На рисунке 1 показаны два изображения, полученные в разных диапазонах. Одно изображение представлено в виде рентгеновского снимка, второе – в виде тепловизионного снимка.



а) б)

Рис. 1. Снимки объекта: а) рентгеновский, б) тепловизионный

Оба изображения имеют одинаковые параметры, а именно число строк и число пикселей в каждой строке. Размер этих изображений составляет 244×367 пикселей. Необходимо - совместить эти изображения, чтобы использовать их для медицинских диагностических исследований.

Наиболее простым методом совмещения изображений является способ формирования матричного изображения. Суть методики состоит в том, что два изображения накладывают одно на другое. При этом яркости пикселей складывают.

Реализуем данную методику на исходных изображениях в среде Matlab. Для начала откроем тепловизионное изображение в цветном спектре с помощью функции rgb и рентгеновское изображение с помощью функции gray. Результат сложения представлен на рисунке 2.

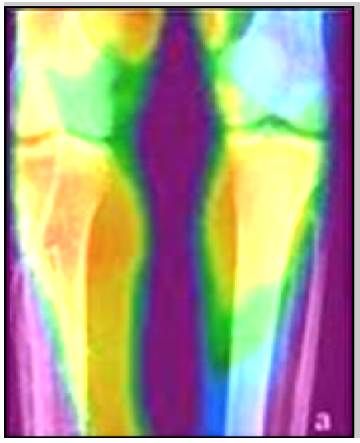


Рис. 2. Изображение, полученное путем сложения яркостей исходных изображении.

Несмотря на то, что в совмещенном изображении видны как инфракрасное изображение объекта, так и рентгеновское изображение, но оно является малопригодным для анализа, и, тем более, для медицинского диагностического исследования, поскольку имеет размытые края отображения патологии на термограмме и не имеет чёткого рентгеновского изображения.

Для устранения этих недостатков в настоящей работе предложена методика пороговой обработки тепловизионных изображений с последующим наложением выделенных фрагментов на рентгеновское изображение в соответствующих областях. Используя пороговую обработку, можно обработать изображение таким образом, что результатом ее станет новое изображение, причем в этом изображении ненужные яркости будут погашены, а интересующие пользователя участки выделены на остальном фоне.

Существует много подходов к решению задачи пороговой обработки цветных изображений [2]. В данном материале эту задачу предлагается решать через анализ интенсивности, насыщенности, цветового фона и нормированных цветовых составляющих.

Суть предлагаемой пороговой обработки заключается в разделении всех элементов изображения на два класса по признаку яркости. Для этого задается некоторое пороговое значение. Уровень порогового значения определяется исходя из известных априорных данных по интенсивности теплового уровня предполагаемого заболевания. Если элемент изображения имеет значение яркости ниже порогового, то он приравнивается к нулю, то есть становится черным и далее гасится, если выше, сохраняется. В предлагаемом методе пороговая обработка выполняется по всем трем каналам цветности – красному, зелёному и синему (rgb).

Для иллюстрации совмещения изображений по предлагаемому методу применим среду MATLAB [3,4]. Результат представлен на рисунке 3.

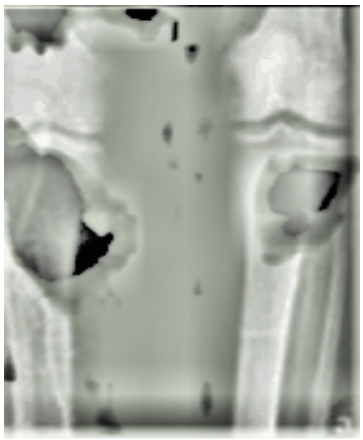
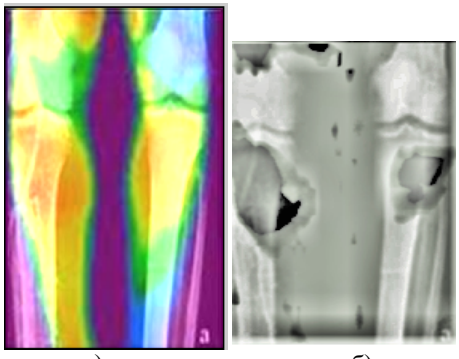


Рис. 3. Изображение, полученное по предлагаемой методике

Отличительным признаком изображения, полученного при использовании предлагаемой методики обработки, который представлен в данной работе является то, что в результате пороговой обработки инфракрасный снимок отражает преимущественно только те области, где температура наиболее высокая. То есть обработанный тепловой снимок, условно говоря, локализует зоны гипертермии, которым соответсвует участки организма, в которых протекает воспалительный процесс.

Сравним изображения, полученные при использовании методики-прототипа и новой методики (рис. 4):



а) б)

Рис. 4. а) – Результат методики прототипа, б) – результат новой методики

Для анализа выделим общие и отличительные черты изображений.

К общим чертам можно отнести то, что оба изображения несут в себе информацию как о рентгеновском изображении, так и об инфракрасном. Следовательно, информативность обоих снимков повысилась относительно исходных изображений. Оба изображения достаточно детализированы и могут использоваться как для анализа, так и для медицинских диагностических исследований.

Отличительным признаком изображения, полученного при использовании предлагаемой методики обработки, который представлен в данной работе как положительный и определяется как преимущество по отношению к прототипу является то, что в результате пороговой обработки инфракрасный снимок отражает преимущественно только те области, где температура наиболее высокая. Таким образом, обработанный тепловой снимок, условно говоря, локализует зоны гипертермии, которым соответсвует участкам организма, в которых протекает воспалительный процесс.

В итоге, изображения, полученные при совмещении рентгеновских и инфракрасных снимков новой методики, могут использоваться при клинической термографии для диагностики и определения заболеваний и патологий, сопровождающихся воспалительным процессом.

Библиографический список

1. КоротаевВ.В., Мельников Г.С., Михеев С.В.. Основы тепловидения/В.В. Коротаев, Г.С. Мельников, С.В. Михеев//– СПб: НИУ ИТМО, 2012 – 122 стр.
2. Пат. 2435221 РФ. Способ совмещения изображений, полученных от различных фотодатчиков / И.Л. Ерош, М.Б. Сергеев, Н.В. Соловьев и др., заявл. 10.12.2007; Опубл. 27.11.2011.
3. Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Компьютерная обработка и распознавание изображений/ В.Т. Фисенко, Т.Ю. Фисенко// Санкт-Петербург, 2008 г., учебное пособие.
4. 13. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. – М.: Техносфера, 2006. – 616с.

УДК 620.178.5; ГРНТИ 50.43.17

ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМ ОБЪЕКТОМ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ВИБРОИСПЫТАНИЯМИ

А.М. Никитин, А.С. Романова

Рязанский государственный радиотехнический университет,

Россия, Рязань, anastasia172@mail.ru

Аннотация. В данной работе рассмотрены вопросы организации управления объектом виброиспытаний, в котором проявляется нелинейная упругая деформация с жесткой восстанавливающей силой. При этом в системе моделируется широкополосная случайная вибрация. Алгоритм управления нелинейным объектом разработан путём модификации базового алгоритма управления [1] на основе результатов анализа частотных свойств данной нелинейности.

Ключевые слова: система управления, нелинейный объект, спектральная плотность

THE MANAGEMENT OF THE NONLINEAR OBJECT CONTROL IN THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF VIBRATION TESTS

A.M. Nikitin, A.S. Romanova
Ryazan State Radio Engineering University
Russia, Ryazan, anastasia172@mail.ru

Abstract. This paper deals with the arrangement of control of the vibration tests object, in which a nonlinear elastic deformation with strict restoring force appears. Meanwhile the broadband random vibration is simulated in the system. The algorithm of nonlinear object control is developed by modifying the basic algorithm of control [1], using the analysis of nonlinearity frequency properties.

Keywords: control system, nonlinear object, spectral density

Автоматизированные системы управления виброиспытаниями (АСУВ) позволяют воспроизвести в лабораторных условиях с помощью специальных стендов вибрационное состояние различных технических объектов, адекватное их реальным условиям эксплуатации. Заменяя натурные испытания лабораторными, можно с помощью подобных систем сократить сроки и стоимость проектирования новой техники, повысить ее надежность.

В работе [1] предложен способ построения цифровой АСУВ, предназначенной для испытаний изделий на широкополосную случайную вибрацию в диапазоне частот до 5 кГц. Структурная схема АСУВ представлена на рисунке 1,

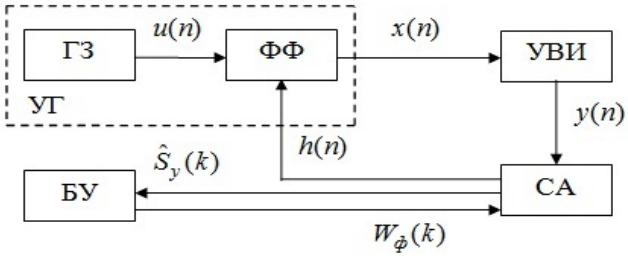


Рис. 1. Структурная схема АСУВ

где ГЗ – генератор равновероятной знаковой последовательности $u(n) \in \{-1,+1\}$, ФФ – формирующий фильтр с изменяемой амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), УВИ – тракт усилитель - вибростенд - изделие, СА – спектроанализатор, БУ – блок управления.

Цель управления в такой системе заключается в настройке управляемого генератора случайного процесса (УГ) на режим близости спектральных плотностей в контролируемой точке объекта $\hat{S}_y(k)$ и заданной спектральной плотности $S_0(k)$ в требуемом диапазоне частот ω_k в плане принятого критерия качества и поддержании этого режима в течение определенного интервала времени.

Формирующий фильтр реализован в классе дискретных фильтров с конечной памятью во временной области и осуществляет операцию линейной свертки весовой функции $h(n)$ с входной равновероятной знаковой последовательностью $u(n), u(n) \in \{-1,1\}$:

$$x(n) = \sum_{m=0}^{N-1} h(m)u(n-m),\ n = 0,1,2\ldots \tag{1}$$

Спектроанализатор вычисляет оценку амплитудного спектра сигнала $y(n)$ в контролируемой точке объекта управления (изделия) в соответствии с методом модифицированных периодограмм следующим образом. Последовательность $y(n)$ разбивается на R не перекрывающихся подпоследовательностей $y_r(n), r = 1,2,\ldots, R$ длиной по N отчетов. Для каждой из подпоследовательностей $y_r(n)$ рассчитываются коэффициенты Фурье $Y_r(k)$:

$$Y_r(k) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} y_r(n) e^{-j(\frac{2\pi}{N})nk}, \quad k = \overline{0, N-1}. \tag{2}$$

Оценка спектральной плотности амплитуд находится следующим образом:

$$\hat{S}_y(k) = \frac{1}{R}\sum_{r=1}^{R} \left|Y_r(k)\right|, k = \overline{0, N/2}. \tag{3}$$

Блок управления вырабатывает новые значения АЧХ ФФ по следующему эффективному в вычислительном отношении итеративному алгоритму [1]:

$$W_{\hat{o}}^{(i)}(k) = W_{\hat{o}}^{(i-1)}(k) + \gamma_i [S_0(k) - \hat{S}_y^{(i)}(k)] W_{\hat{o}}^{(i-1)}(k) / \hat{S}_y^{(i)}(k), k = \overline{0, N/2}, \tag{4}$$

где i - номер итерации, $\gamma_i = 1/i$ - коэффициенты, обеспечивающие сходимость.

Точность достижения заданного вибрационного состояния оценивается следующими показателями:

$$\overline{E} = \frac{1}{N1}\sum_{k=0}^{N1-1} \frac{\left|S_0(k) - \hat{S}_y(k)\right|}{\overline{S_0}} \cdot 100\,\%, \tag{5}$$

$$\overline{E^2} = \frac{1}{N1}\sum_{k=0}^{N1-1} \left[\frac{S_0(k) - \hat{S}_y(k)}{\overline{S_0}}\right]^2 \cdot 100\,\%, \tag{6}$$

где $\overline{S_0} = (1/N1)\sum_{k=0}^{N1-1} S_0(k)$ - среднее значение заданной спектральной плотности, а $N1$ - число отчетов спектральной плотности, приходящихся на заданный частотный диапазон.

Алгоритм управления (4) разработан и исследован для случая, когда тракт УВИ рассматривается как линейная динамическая система. В этом случае погрешность воспроизведения заданной спектральной плотности порядка 3÷5 % по выражениям (5) и (6) достигается уже после первой итерации алгоритма управления.

Однако в реальных задачах тракт УВИ почти всегда характеризуется нелинейными свойствами. Эти свойства присущи всем его элементам (усилителю, вибратору, изделию), но наиболее заметно они проявляются в испытуемом изделии. В сложных механических изделиях нелинейные эффекты, обусловленные такими явлениями, как люфт, упор, нелинейные упругие деформации, существенно обогащают спектр выходного сигнала.

Целью настоящей работы является модификация базового алгоритма управления (4) для достижения удовлетворительной отработки заданного вибрационного состояния объекта при пошаговом выходе на режим нагружения. Будем считать, что в объекте управления проявляется одна из наиболее часто встречающихся на практике нелинейностей - нелинейная упругая деформация с жесткой восстанавливающей силой.

Дифференциальное уравнение для данной нелинейности с параметрами k_0, ω_0 и ξ имеет следующий вид [2]:

$$\ddot{y}(t) + 2\xi\omega_0\dot{y}(t) + \omega_0^2 y(t) = k_0\omega_0^2 x(t) - y^3(t). \tag{7}$$

Обозначив $y = y_1$, запишем уравнение (7) в форме Коши:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2, \\ \dot{y}_2 = k_0\omega_0^2 x - 2\xi\omega_0 y_2 - \omega_0^2 y_1 - y_1^3. \end{cases}$$

В работе [2] приведена схема моделирования частотных свойств рассматриваемой нелинейности, разработанная в пакете SIMULINK системы MATLAB, в соответствии со структурной схемой на рисунке 2.

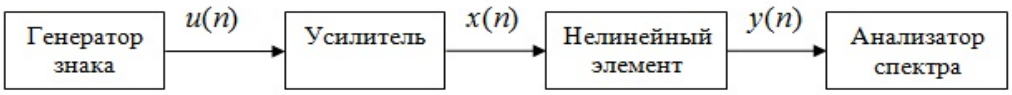


Рис. 2. Структурная схема моделирования частотных свойств нелинейного объекта

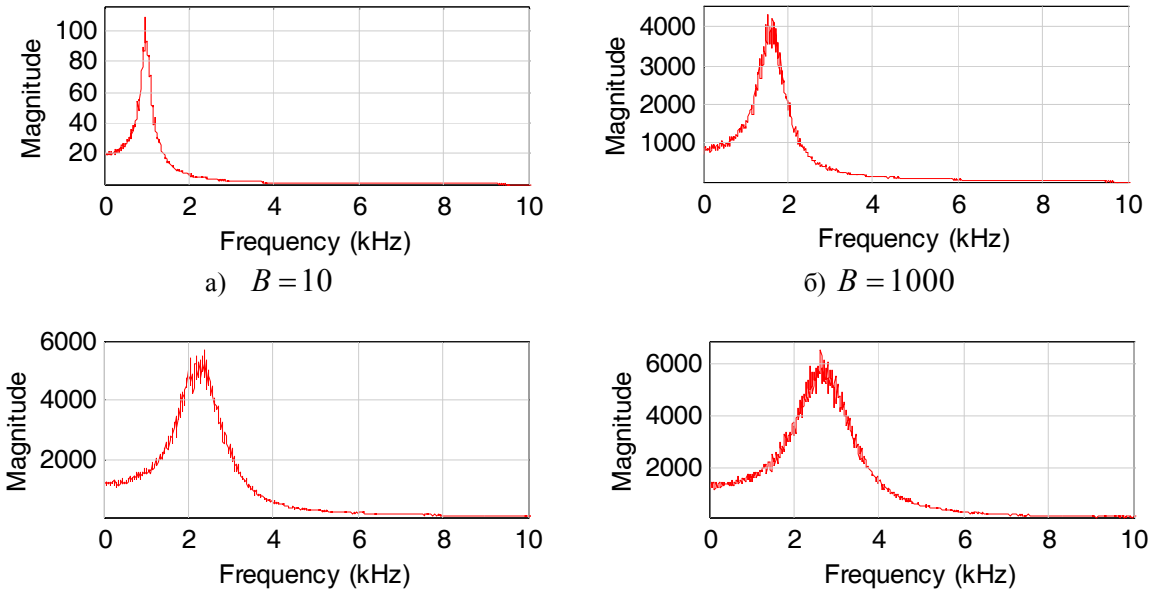
Усилитель с передаточной функцией $W_y(p) = B$ предназначен для изменения мощности входного сигнала нелинейного элемента $x(n)$. Анализатор спектра вычисляет оценку амплитудного спектра выходного сигнала нелинейного элемента $y(n)$ в соответствии с выражениями (2) и (3).

Моделирование самой нелинейности не представляет существенных затруднений, поскольку в пакете SIMULINK имеется специальный редактор дифференциальных уравнений – DEE, в котором необходимо только записать дифференциальное уравнение в форме Коши. Проведём моделирование для следующих численных значений параметров уравнения (7):

$$k_0 = 10, \omega_0 = 2\pi \cdot 1000 = 6283\, рад/с, \xi = 0{,}1.$$

В модели частота квантования составляет 20 кГц при размере кадра БПФ $N = 2048$ отчетов и $R = 100$.

Результаты моделирования для некоторых значений B представлены на рисунках 3,а,б,в,г. При значении $B \geq 4000$ происходит сбой в работе программы при численном решении дифференциального уравнения (7), что можно интерпретировать как разрушение объекта управления. Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о том, что при увеличении дисперсии сигнала $x(n)$ резонансный пик смещается в область верхних частот с одновременным нелинейным увеличением его амплитуды. Данную информацию можно использовать для организации управления таким объектом.



а) $B = 10$ б) $B = 1000$

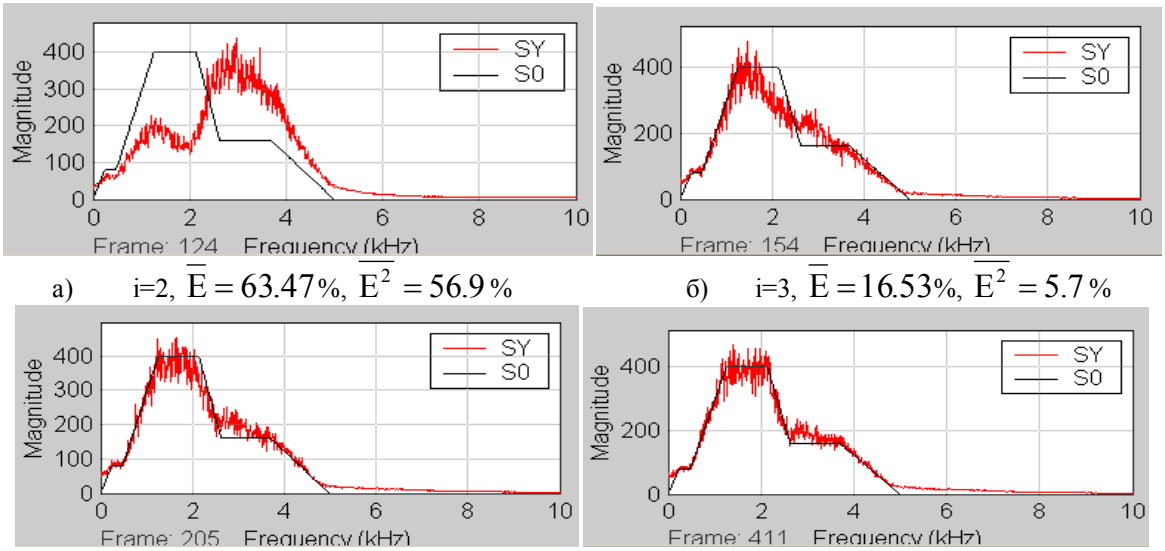
в) $B = 2500$ г) $B = 3900$

Рис. 3. Результаты моделирования нелинейного объекта

В [2] приведена схема моделирования системы управления, представленной на рисунке 1, разработанная в пакете SIMULINK системы MATLAB. Показано также, что при использовании алгоритма (4) для организации управления нелинейным объектом (7), при выходе на режим нагружения за один шаг получаются неудовлетворительные результаты. Причина этого в том, что вычисленная на первой итерации новая АЧХ ФФ $W_{\phi}^{(1)}(k)$ на основе сопоставления $S_0(k)$ и $S_y^{(1)}(k)$, приводит к значительному увеличению дисперсии входного сигнала не-

линейного объекта, что вызывает смещение резонансного пика в область верхних частот. На последующих итерациях дисперсия выходного сигнала УГ существенно не меняется, однако поправка к предыдущей АЧХ ФФ $W_{\phi}^{(i-1)}(k)$ в алгоритме (4) берется с коэффициентом $\gamma_i = 1/i < 1$, что существенно затягивает достижение заданного вибрационного состояния. Анализ полученных результатов позволяет следующим образом модифицировать алгоритм управления (4). На нескольких первых итерациях, когда дисперсия выходного сигнала УГ меняется существенно, целесообразно положить коэффициент $\gamma_i = 1$. После достижения удовлетворительных результатов отработки заданного спектра, этот коэффициент можно ввести, начиная со значения $i = 3$.

На рисунках 4 а, б, в, г, представлены результаты моделирования модифицированного алгоритма управления соответственно на второй, третьей, четвертой и шестой итерациях.



а) i=2, $\overline{E} = 63.47\%$, $\overline{E^2} = 56.9\%$ б) i=3, $\overline{E} = 16.53\%$, $\overline{E^2} = 5.7\%$

в) i=4, $\overline{E} = 11.98\%$, $\overline{E^2} = 2.77\%$ г) i=6, $\overline{E} = 9.15\%$, $\overline{E^2} = 1.59\%$

Рис. 4. Результаты моделирования АСУВ

В данном случае полагалось $\gamma_i = 1$, при i=1,2,3 и $\gamma_i = 1/2, 1/3, 1/4...$, при i=4,5,6…,.

Данный метод целесообразно использовать для настройки системы при пошаговом выходе на режим нагружения, в соответствии с технологией проведения испытаний. В этом случае весь диапазон заданной спектральной плотности от 0 до максимального значения разбивается на ряд одинаковых уровней, исходя из особенностей конкретного объекта. На каждом уровне происходит отработка заданной формы спектра с необходимой точностью, после чего переходят к следующему уровню. После выхода на максимальный уровень нагружения и достижения необходимой точности, начинается процесс испытаний объекта в течение заданного времени.

Для рассматриваемой в работе конкретной нелинейности управление коэффициентом γ_i позволяет добиться удовлетворительного результата, но скорость сходимости алгоритма управления существенно снижается.

Библиографический список

1. Демашов В.С., Кузнецов В.П., Никитин А.М. Автоматизированная система управления виброиспытаниями // приборы и системы управления. -1993. - №9. - С.28-31.
2. Никитин А.М., Селезько Е.В. Алгоритм управления нелинейным объектом виброиспытаний // Обработка информации в автоматических системах: Сб. научн. тр. – Рязань, РГРТУ, 2006. – С.83-89.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.35

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИСКАЖЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

В. Жданов, Т. Шестакова, Г. Сорокин
Технический Университет Молдовы,
Республика Молдова, Кишинэу, ger_sor@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрены причины возникновения искажений изображений типа смазывание, дефокусирование и зашумление. Рассмотрены известные методы восстановления искаженных изображений: инверсная фильтрация, фильтрация методом минимизации среднеквадратического отклонения (фильтрация Винера), фильтрация методом минимизации сглаживающего функционала со связью (регуляризация Тихонова), итерационный нелинейный алгоритм Люси-Ричардсона (метод максимального правдоподобия). Проведено сравнение перечисленных алгоритмов, выявлены их преимущества и недостатки применительно к восстановлению изображений. Определены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: функция рассеяния точки, смаз, инверсная фильтрация, итерационные алгоритмы.

ANALYSIS OF THE METHODS OF RESTORATION OF DISTORTED IMAGES FROM OPTOELECTRONIC SYSTEMS.

V. Jdanov, T. Shestakova, G. Sorokin
Technical University of Moldova,
Republic of Moldova, Chisinau,ger_sor@mail.ru

Abstract. In the work were shown the causes of distortions of images such as blurring, defocusing and noise. The known methods for restoring the distorted image: inverse filtering, filtering by minimizing the standard deviation (Wiener filter) filtration method to minimize the smoothing functional with a link (Tikhonov regularization), a non-linear iterative algorithm Lucy-Richardson (maximum likelihood method) were considered. A comparison of these algorithms, identified their strengths and weaknesses in relation to recovery was held on. The directions for further research were determined.

Keywords: point spread function, blur, inverse filtering, iterative algorithms.

1. Введение

В настоящее время для регистрации, обработки и передачи данных (в частности, изображений) наибольшее распространение получили технические системы измерений и обработки информации, которые обычно представляют результат в виде цифрового изображения. Под техническими системами измерений и обработки информации в данной статье подразумеваются системы, включающие устройства регистрации изображений (фотоаппараты, цифровые фото- или видеокамеры, микроскопы, телескопы, томографы и т.д.) и вычислительные устройства.

В технических системах обработки информации изображение обычно регистрируется матрицей сенсоров на основе ПЗС- или КМОП -матрицы. При наблюдении и измерении изображений объектов могут возникать искажения, среди которых наиболее сложными (с математико-компьютерной точки зрения) являются смазывание, дефокусирование и зашумление. В результате возникает необходимость восстановления (реконструкции) математико-компьютерным путем искаженных изображений.

2. Основная часть

Основными причинами искажений, приводящих к ухудшению четкости, являются: ограниченная разрешающая способность формирующей системы, аберрации оптических систем, расфокусировка (дефокусирование), наличие искажающей среды (например, атмосферы), движение камеры по отношению к регистрируемому объекту и т.п. Большинство искажений, возникающих на изображениях, в том числе и смаз, связаны с несовершенством систем наблюдения. Существует два принципиальных способа устранения искажений. Первый состоит в совершенствовании измерительных устройств, второй - заключается в использовании математической обработки результатов измерений с целью устранения искажающих факторов.

Реконструкция искаженного изображения описывается обычно набором одномерных интегральных уравнений Вольтерра I рода:

$$(1/\Delta)\int_{x}^{x+\Delta} f_y(\xi)d\xi = g_y(x) + n_y(x)\ , \qquad (1)$$

или одномерных интегральных уравнений Фредгольма I рода свертки:

$$\int_{-\infty}^{\infty\Delta} h(x-\xi)f_y(\xi)d\xi = g_y(x) + n_y(x)\ , \qquad (2)$$

или иногда двумерным интегральным уравнением Фредгольма I рода свертки:

$$\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} h(x-\xi, y-\eta)f(\xi,\eta)d\xi d\eta = g(x,y) + n(x,y)\,. \qquad (3)$$

В приведенных выше уравнениях Δ – величина смаза, *h* – функция рассеяния точки (ФРТ или PSF – point spread function), которая определяет характер искажения точек изображения и, обычно пространственно-инвариантная, *f* и *g* – распределение интенсивности по неискаженному и искаженному изображениям соответственно, *n(x,y)* – шум. В (1) и (2) ось *x* направлена вдоль смаза, а *y* играет роль параметра. Интегральные уравнения (1) и (2) обычно используются в задаче смазывания, а (3) – в задаче дефокусирования, но нередко уравнение (3) используется для решения обеих задач.

Решению этих задач посвящено большое количество работ, отличающихся постановкой задачи, видом используемой функции размытия точки, выбором критериев и показателей эффективности обработки изображений [1 - 5].

Операция применения искажающей функции (ФРТ) к другой функции (к изображению, в данном случае) называется сверткой (от англ.convolution). Смысл операции свертки состоит в том, что в формировании значения точки *К* с координатами (x_o,y_o), принадлежащей искаженному изображению *g*, принимают участие точки из некоторой окрестности Δ точки *Д* с координатами (x_o,y_o), принадлежащие исходному изображению *f*. Причем размер окрестности Δ и вклад точек из окрестности *Д* в формирование значения точки *К* целиком определяется искажающей функцией. Для пояснения вышесказанного рассмотрим пример. Предположим, что ведется работа с растровым (пиксельным) изображением, имеющим разрешение $M \times N$. В таком случае переменные *x* и *y* будут определять порядковый номер пикселя изображения, следовательно, $x \in 0, 1, \ldots, M$; $y \in 0, 1, \ldots, N$. Пусть окрестность Δ имеет размер $m \times n$. Тогда математически процесс применения операции свертки к изображению *f* с размерами M x N и искажающей функцией *h* с размерами m x n записывается следующим образом:

$$g(x,y) = h(x,y) * f(x,y) + n(x,y) = \sum_{i=-a}^{a}\sum_{j=-b}^{b} h(i,j)f(x+i, y+j) + n(x,y), \qquad (4)$$

где a = | (m – 1)/2 |; b =| (n – 1)/2 |; * - оператор свертки.

На практике часто a = b. В этом случае число ***a*** называется размерностью искажающей функции. Размерность искажающей функции, как правило, меньше размерности самого изображения.

Известные методы восстановления искаженных изображений реализуются, как правило, на основе знания функции рассеяния точки (ФРТ) или оптической передаточной функции (ОПФ) канала наблюдения, часто априорно неизвестных или известных неточно.

Если решать уравнение (4), то для получения функции *f(x,y)* (восстановления изображения) получится огромная система уравнений.

Для упрощения процедуры восстановления используют преобразование Фурье [1,3], а именно – теорему о свертке, которая гласит, что операция свертки в пространственной области эквивалентна обычному умножению в частотной области, поэтому приведенное выше уравнение модели искажения в пространственной области (4) можно записать в эквивалентном представлении в частотной области:

$$h(x,y) * f(x,y) + n(x,y) = H(u,v) \cdot F(u,v) + N(u,v), \quad (5)$$

где $H(u,v)$, $F(u,v)$ и $N(u,v)$ – Фурье-образы соответствующих функций.

Функцию $H(u,v)$ часто называют оптической передаточной функцией (ОПФ или OTF, от англ. Optical Transfer Function). В этом случае приведенное выше уравнение модели искажения в пространственной области (1.4) можно записать в эквивалентном представлении в частотной области:

$$G(u,v) = H(u,v) \cdot F(u,v) + N(u,v). \quad (6)$$

Получение точной оценки искажающей функции является одним из важных шагов при восстановлении искаженных изображений. Можно выделить три основных способа получения оценки искажающей функции: *визуальный анализ*, заключающийся в выделении информации непосредственно из изображения; *экспериментальный анализ*, заключающийся в проведении экспериментов с системой, аналогичной той, с помощью которой получено искаженное изображение и *математическое моделирование* искажающей функции [5].

Рассмотрим алгоритмы восстановления изображений, искаженных оператором H, пространственный образ которого задан или определен с помощью способов, отмеченных выше.

Инверсная фильтрация. Инверсная фильтрация является простейшим способом восстановления и заключается в получении оценки $\hat{F}(u,v)$ Фурье-преобразования исходного изображения делением Фурье-образа искаженного изображения (6) на оператор H:

$$\hat{F}(u,v) = F(u,v) + \frac{N(u,v)}{H(u,v)}. \quad (7)$$

Деление в формуле (7) понимается как поэлементное. Приведенное уравнение показывает, что, даже при известной искажающей функции, точное восстановление изображения невозможно (кроме случая когда отсутствует аддитивный шум ($N(u,v) = 0$).Функция $N(u,v)$ является Фурье-образом случайной величины и неизвестна. Более того, если эта функция принимает нулевые или близкие к ним значения, то второе слагаемое в (7) может на порядок превышать значения функции $F(u,v)$, что приводит к невозможности восстановить изображение данным методом.

Метод оптимальной фильтрации Винера. В указанном фильтре изображение и шум рассматриваются как случайные процессы и находится такая оценка $\hat{f}(x,y)$ для неискаженного изображения $f(x,y)$, чтобы среднеквадратическое отклонение этих величин было минимальным. Очевидно, что минимум этого выражения можно получить и в частотной области и задается оно следующим уравнением:

$$\hat{F}(u,v) = \left(\frac{1}{H(u,v)} \frac{|H(u,v)|^2}{|H(u,v)|^2 + \frac{S_n(u,v)}{S_f(u,v)}} \right) \cdot G(u,v), \quad (8)$$

где $S_n(u,v)$ - энергетический спектр шума $n(x,y)$;

$S_f(u,v)$ - энергетический спектр исходного изображения $f(x,y)$.

Выражение (8) показывает, что при отсутствии шума фильтр Винера превращается в обычный инверсный фильтр. На практике спектры шума и неискаженного изображения неизвестны и не могут быть оценены. В этом случае их отношение обычно заменяют на некоторую константу К, называемую отношением сигнал/шум. Она может быть подобрана в интерактивном режиме и фильтрация, основанная на применении константы в знаменателе (8), называется параметрической фильтрацией Винера [1]. Таким образом, фильтрация методом минимизации среднеквадратического отклонения, используя данные о спектральных харак-

теристиках изображения и шума, обладает хорошей помехозащищенностью и у него отсутствует сингулярность в случае нулей передаточной функции формирующей системы.

Метод сглаживающего функционала. Реализация метода минимизации сглаживающего функционала (метод Тихонова) требует только знания среднего значения и дисперсии шума. Это является важным преимуществом метода, поскольку на практике можно оценить указанные величины на основе искаженного изображения [1,5].

В качестве сглаживающего функционала можно применить квадрат нормы лапласиана [1]:

$$C(f) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (\nabla f(x,y))^2, \tag{9}$$

где M x N – размер искаженного изображения $g\,(x,y)$.

Нахождение экстремума выражения (9) в частотной области может быть записано в следующем виде [1]:

$$\hat{F}(u,v) = \left(\frac{H^*(u,v)}{|H(u,v)|^2 + \gamma |P(u,v)|^2} \right) \cdot G(u,v), \tag{10}$$

где γ – параметр регуляризации; $P(u,v)$ - Фурье-преобразование оператора Лапласа (матрицы (3 x 3)). Следует отметить тот факт, что при обращении параметра регуляризации γ в ноль уравнение (10) сводится к инверсной фильтрации.

Метод Люси-Ричардсона. Рассмотренные выше методы восстановления искаженных изображений являются линейными. Данный метод относится к нелинейным методам. Его отличительной способностью является использование итерационных процедур, что потенциально может дать более лучший результат при восстановлении изображений. При этом используется метод максимального правдоподобия для которого предполагается, что анализируемое изображение подчиняется распределению Пуассона, а вычислительный алгоритм имеет вид:

$$\hat{f}_{k+1}(x,y) = \hat{f}_k(x,y) \left(h(-x,-y) * \frac{g(x,y)}{h(x,y) * \hat{f}_k(x,y)} \right). \tag{11}$$

Так как все вычисления в (11) выполняются в пространственной области, то это уменьшает вычислительную громоздкость алгоритма восстановления. Однако при использовании метода Люси-Ричардсона возникают сложности с выбором критерия остановки итерационного процесса, что может привести к значительному увеличению времени обработки искаженного изображения.

Для проведения имитационного моделирования работы алгоритмов восстановления изображений, рассмотренных выше использовался математический пакет MATLAB, в который входит библиотека IPT (Image Processing Toolbox), содержащая функции цифровой обработки изображений [2].

В данной работе для моделирования искажающей функции использовался следующий алгоритм. Функция разброса точек PSF задаётся при помощи оператора fspecial библиотеки IPT в следующем виде:

PSF = fspecial (‘motion’, len, theta).

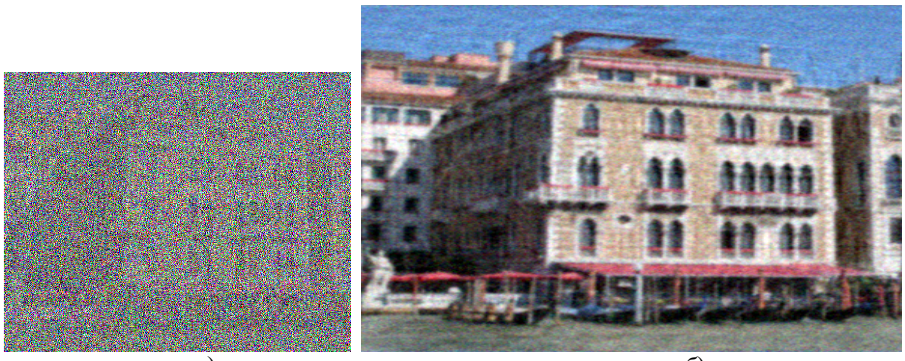
Оператор fspecial позволяет моделировать эффект линейного перемещения камеры относительно фиксируемого объекта, тем самым позволяя получить искажение типа «размытие». Процесс добавления помехи аддитивного гауссова шума моделировался посредством функции библиотеки IPT imnoise. Гауссов шум имеет следующие характеристики: нулевое математическое ожидание и дисперсию, равную 10^{-5}.

На рисунках 1, *а* и 1, *б* показаны оригинальное изображение наблюдаемого объекта и результат работы модели искажения изображения соответственно.

а) *б*)

Рис. 1. Результаты программного размытия и зашумления исходного изображения:
а) – исходное изображение; *б*) – размытое и зашумленное изображение

Используя библиотеку IPT и функцию deconvolution для рассмотренных выше алгоритмов восстановления, получены следующие результаты моделирования. На рисунке 2, *а* показано восстановленное изображение методом инверсной фильтрации для дисперсии шума $5 \cdot 10^{-6}$. Проведенный эксперимент подтверждает, что инверсная фильтрация показывает хорошие результаты лишь при отсутствии шума. На рисунке 2, *б* приведен результат восстановления изображений методом минимизации среднеквадратического отклонения (фильтрация Винера).



а) *б*)

Рис. 2. Результаты восстановления искаженных изображений:
а) методом инверсной фильтрации noise var $-5 \cdot 10^{-6}$; *б*) фильтрацией Винера

Рис. 3. Результаты восстановления искаженных изображений:
а) – регуляризацией Тихонова; *б*) – методом Люси – Ричардсона

На рисунке 3 показаны результаты восстановления искаженного изображения методом минимизации сглаживающего функционала со связью (регуляризация Тихонова, рис. 3, *а*) и алгоритмом итерационного нелинейного восстановления Люси – Ричардсона (рис. 3, *б*). Дисперсия шума в обоих случаях одинакова и равна 10^{-5}.

Можно отметить, что результаты восстановления изображений последними тремя методами сопоставимы один с другим.

Рассмотренные выше методы основываются на знании искажающей функции. Как правило, при обработке реальных изображений точное выражение ФРТ неизвестно или известно приблизительно путем анализа изображений по характерным фрагментам. При этом на изображении отыскиваются точечные или линейно-протяженные объекты, порожденные удаленными источниками. Такими объектами в оптической астрономии служат звезды, в аэрофотосъемке – кромки дорог и границы теней от протяженных сооружений [4].

Для обработки изображений в случае неизвестной ФРТ разработано целое семейство методов, называемых слепой деконволюцией [1]. При этом выбирается первое приближение ФРТ, далее по одному из методов делается деконволюция, после чего с использованием некоторого критерия определяется степень качества. Затем на основе полученного изображения уточняется ФРТ, и итерация повторяется до достижения нужного результата.

Другой способ получения ФРТ и её параметров возможен путём анализа фазовой характеристики пространственного спектра искажённого изображения [3]. В [3] показано, что задача восстановления неискаженного изображения при искажении, например, Гауссовым смазом, может быть переформулирована в задачу восстановления неискаженного изображения только по фазе его Фурье спектра и по отношению модулей спектров искаженного и неискаженного изображений.

Заключение

Алгоритм восстановления изображений методом инверсной фильтрации показывает идеальные результаты при восстановлении размытых незашумленных изображений, однако даже при небольшом уровне шума (гауссов шум с математическим ожиданием 0 и дисперсией 10^{-7}) на восстановленном изображении стали проявляться значительные искажения. При уровне дисперсии шума $5 \cdot 10^{-6}$ результат восстановления стал практически неразборчивым, что говорит о низкой стойкости этого метода к аддитивному шуму.

При значении дисперсии аддитивного шума 10^{-5} алгоритм восстановления изображений методом параметрической фильтрации Винера, алгоритм восстановления изображений методом минимизации сглаживающего функционала (регуляризация Тихонова), алгоритмом итерационного нелинейного восстановления Люси – Ричардсона показали относительно хорошие результаты. Это свидетельствует о гораздо более высокой стойкости данных методов к аддитивному шуму по сравнению с инверсной фильтрацией.

Однако реконструкция искаженных изображений данными методами не позволяет предотвратить появление на восстановленных изображениях краевых эффектов (эффекта ложных волн, эффекта Гиббса), устранение которых требует специального решения. Большинство методов реконструкции искаженных изображений, как уже было сказано, основаны на использовании преобразования Фурье. Однако аппарат ПФ неадекватен физической сути задачи смазывания, в которой сама природа использует лишь операцию накопления (суммирования) в пределах величины смаза Δ.

Очевидно, что наилучшие результаты должны давать методы, в которых как прямая (моделирование искаженного изображения), так и обратная (реконструкция или восстановление изображения) задачи решаются с использованием лишь операций суммирования, что и является направлением дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений*, Москва, Техносфера, 2005, 1072 с.
2. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. *Цифровая обработка изображений в средеMathLab*. Москва, Техносфера, 2006, 618 с.
3. Новейшие методы обработки изображений /[А.А.Потапов, Ю.В.Гуляев, С.А.Никитов, А.А.Пахомов, В.А.Герман] под ред. А.А.Потапова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 456 с.
4. Костевич А.Г. Экспериментальное определение функции рассеяния точки по произвольным фрагментам изображений / А.Г. Костевич, В.А. Краснянский // Матер. 4-й Междунар. конф. «Распознавание–99». – Курск, 1999. – С. 110–112.
5. В.И. Майорова, А.М. Банников, К.И. Зайцев. Математическое моделирование процесса радиометрической коррекции снимков ДЗЗ. *Инженерный журнал: наука и инновации*, *2013, вып. 3.* URL: http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/hidden/641.html

УДК 004.93; ГРНТИ 28.23.15

ПОИСК И ВЫДЕЛЕНИЕ КЛЮЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

С.И. Косицына
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, kositsyna.lana@mail.ru

Аннотация. В данной работе представлены общие алгоритмы поиска и выделения ключевой информации с практической их реализацией в виде написанных функций.

Ключевые слова: распознавание ключевой информации, кластерный анализ, алгоритм распознавания.

SEARCH AND SELECTION OF KEY INFORMATION ON IMAGES

S.I. Kositsyna
Ryazan radioengineering university,
Russia, Ryazan, kositsyna.lana@mail.ru

Abstract. In hired the general algorithms of search and selection of key information are presented with their practical realization as the written functions.

Keywords: recognition of key information, cluster analysis, algorithm of recognition.

1. Введение

Поиск и выделение ключевой информации на изображениях – одна из важнейших задач для исследований в области систем технического зрения (СТЗ) и искусственного интеллекта.

Под СТЗ понимают совокупность аппаратных и программных средств, необходимых для автоматического анализа изображений, с целью распознавания объектов, определения их координат, с дальнейшим формированием решений, и выработкой сигналов управления. СТЗ позволяет оптимизировать производственные процессы, заменить ручной труд машинным там, где это возможно. Эффективное использование СТЗ достигается на конвейерах в промышленности, в системах видеонаблюдения.

Под системами искусственного интеллекта понимают системы, созданные на базе ЭВМ, которые имитируют решение человеком сложных интеллектуальных задач.

При передаче видеоинформации по радиоканалу, выделение ключевой информации на изображениях позволяет снизить требование к пропускной способности радиолинии.

В данной работе представлены общие алгоритмы поиска и выделения ключевой информации с практической их реализацией в виде написанных функций. Для программной реализации используемых функций была применена интерактивная среда программирования «MATLAB», пакет расширения Image Processing Toolbox, содержащий полный набор типовых эталонных алгоритмов для обработки и анализа изображений, в том числе функций фильтрации, частотного анализа, улучшения изображений, морфологического анализа и распознавания, что достаточно упрощает процесс решения данной задачи. Существуют и другие программные решения задачи обработки изображений, такие как, библиотека компьютерного зрения OpenCV – (Open Computer Vision) — библиотека с открытым исходным кодом, предоставляющая набор типов данных и численных алгоритмов для обработки изображений алгоритмами компьютерного зрения, реализованная на языке программирования C,C++.

2. Способы выделения ключевой информации на изображении. Общий алгоритм

Существует множество алгоритмов и методов распознавания изображений, один из наиболее часто применяющихся методов состоит из трёх основных компонент:

1. предварительная обработка, преобразование изображения в стандартное представление.
2. выделение ключевых характеристик, формирование набора признаков.
3. механизм классификации: кластерная модель, нейронная сеть и т. п.

Этап предварительной обработки особенно важен, так как от качества его решения во многом будет зависеть эффективность решения задачи распознавания в целом. Часто изображение бывает зашумлено, может иметь слабую контрастность, а низкий уровень контрастности и наличие шума препятствуют работе основных стандартных функций. Перед тем как приступить к обработке изображения, необходимо снизить влияние данных мешающих

факторов, для чего применяют различные стандартные алгоритмы предварительной обработки. К алгоритмам предварительной обработки можно отнести функцию устранения шума (Id=imnoise(Is, type, params)), функцию повышения контрастности (B=imfilter(A,H)), функцию фильтрации мусора - устранения или перемещения объектов минимальной площади (BW2=bwareaopen (BW,P)). Так же к предварительной обработке можно отнести функцию бинаризации (BW=im2bw(S, threshold)), так как проще работать с чёрно-белыми изображениями.

На этапе выделения ключевых характеристик используются более сложные функции для формирования набора признаков, которые будут необходимы на этапе механизма классификации.

Существует несколько механизмов классификации. К ним относят кластерную модель, свёрточные нейронные сети и другие. Задачей распознавания является вычисление принадлежности объекта к определённому классу путем анализа вектора значений наблюдаемых признаков. Алгоритм распознавания должен выявить соответствие значений признаков объекта классу, к которому принадлежит данный объект. Выявление осуществляется с помощью уже имеющегося набора объектов – обучающей совокупности, для которых известны либо значения и признаков и классов, либо только значения их признаков. В первом случае задача называется задачей обучения распознаванию образов с учителем, а во втором — без учителя. В задаче распознавания с обучением правило классификации должно вырабатываться на основе исследования множества объектов с известной принадлежностью различным классам. В задаче автоматического формирования образов объекты предъявляются «наблюдателю» без указания их принадлежности классам (распознавание без учителя). Наблюдатель (алгоритм распознавания) должен самостоятельно построить соответствующее определение классов (кластерный анализ).

Рассмотрим модель кластерного анализа.

В общем случае, под моделью кластерного анализа понимают отнесение некоторого объекта к определённому классу по признакам, которые его характеризуют. Данные признаки являются независимыми измеряемыми величинами. Для начала составляется выборка n измеряемых величин объекта, подлежащего классификации, а затем результат рассматривается как точка в n-мерном пространстве признаков. Вектор признаков образуется как совокупность этих величин. В итоге, будем считать, что неизвестный объект принадлежит классу, соответствующему той части, в которую попал вектор признаков.

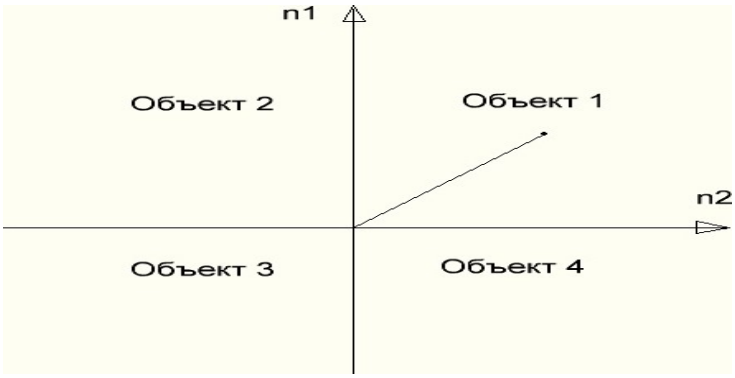


Рис. 1. Распознавание объекта по n=2-признакам

Так же рассмотрим свёрточные нейронные сети.

Свёрточные нейронные сети (СНС) осуществляют распознавание объектов по средствам пропускания исходного изображения через ряд свёрточных, нелинейных слоев, слоев объединения и полносвязных слоёв, по средствам которого генерируется вывод. В качестве вывода может быть класс или вероятность классов, которые лучше всего описывают изображение.

3. Практическая реализация алгоритмов выделения ключевой информации на изображении

Для более детального рассмотрения решения задачи выделения ключевой информации на изображении приведу в качестве примера функцию, созданную по средствам стандартных функций среды программирования «MATLAB». Данная функция определяет положение и ориентацию объекта по признакам его характеризующим. В качестве ключевой информации выступает координата центра объекта и сам объект. В данном примере объектом распознавания является квадрат, признаком, определяющим его принадлежность к данному классу, является коэффициент заполнения «Extent», значение которого должно ровняться 1, но с учётом погрешности оно должно быть не менее 0.85 или 85%.

Результат работы данной функции представлен на рисунке 2.

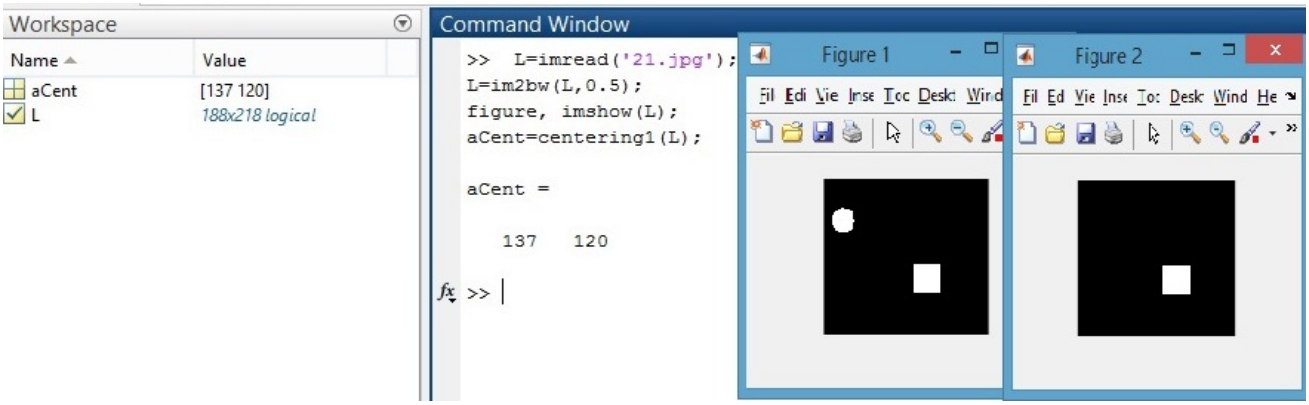


Рис. 2. Результат работы функции

Ниже представлена запись функции.

```
function aCent=centering5(L)
[L, num]=bwlabel(L,8);
STATS=regionprops(L, 'Extent');
idx=find([STATS.Extent] > 0.85);
BW2=ismember(L, idx);
figure, imshow(BW2);
[BW2, num2]=bwlabel(BW2,8);
S=regionprops(BW2, 'Centroid');
aCent=[S.Centroid]
end
```

Рассмотрим подробнее принцип работы функции.

Стандартная функция [L,num]=bwlabel(L,8) формирует матрицу меток L. Каждый элемент данной матрицы меток равен номеру объекта, которому принадлежит соответствующий пиксел изображения L. Элементы данной матрицы меток, имеющие значение «0» относится к пикселям фона, «1» к пикселям первого объекта, «2» к пикселям второго, «n» к пикселям n-го объекта, параметр «num» выдаёт число областей. Нужно иметь в виду, что перед тем как применять данную функцию, необходимо произвести бинаризацию изображения. Затем применяется стандартная функция STATS=regionprops(L, 'Extent'), которая обращается к матрице меток L и работает с информацией об объектах, измеряет набор характеристик для каждой области. Далее, зная набор определённых, измеренных нами с помощью предыдущей функции характеристик, с помощью следующей стандартной функции «find» находим объект, удовлетворяющий значению заданной нами характеристики. Далее с помощью функции «ismember» осуществляем удаление объектов, несоответствующих данному значению коэффициента заполнения. Затем снова формируем матрицу меток, с помощью функции «regionprops» вычисляем значение центра фигуры и, заключительным этапом, выводим координаты центра в командное окно.

Как видно, данная функция осуществляет классификацию с помощью кластерного анализа. Предварительная обработка для данного изображения была необязательна.

Так же можно привести пример ещё одной функции распознавания. Данная функция осуществляет выделение текста на изображении путём ограничения его рамкой.

Ниже представлена запись функции.

```
function I2=sel(I1)
resalt=ocr(I1);
wordBox=resalt.WordBoundingBoxes;
I2 = insertShape(I1, 'Rectangle', wordBox, 'Color', 'red');
end
```

Рассмотрим подробнее принцип работы функции.

Стандартная функция txt =ocr(I) возвращает txt -объект-изображение, содержащее информацию оптического распознавания символов из входного изображения. Объект содержит распознанный текст, его расположение и метрику. Функция wordBox=resalt.WordBound. вычисляет координаты точек, необходимые для правильного расположения рамки, которая будет ограничивать текст. Функция I2 = insertShape(I1, 'Rectangle', wordBox, 'Color', 'red') формирует изображение I2, которое представляет собой исходное изображение I1, с добавлением прямоугольной рамки красного цвета. Рамка располагается в определённом месте, выбранном по заданным координатам пикселей, которые были вычислены в предыдущей функции. Таким образом, происходит выделение прямоугольной рамкой текста на изображении.

Это несложные примеры, на основе которых можно осуществлять распознавание различных объектов.

Выводы

Наиболее эффективным решением задачи поиска и выделения ключевой информации на изображениях является использование предназначенных для этого сред программирования таких, как «MATLAB», OpenCV и др. Существует множество алгоритмов распознавания, один из наиболее широко применяющихся алгоритмов состоит из трёх компонент:

1. Предварительная обработка
2. Формирование набора признаков
3. Моделирование

Задача распознавания объектов одна из актуальных и важных задач в настоящее время. Она касается областей систем технического зрения (СТЗ) и искусственного интеллекта, поиск и выделение необходимой нам информации так же помогает снизить требования к пропускной способности радиолинии, при передаче по радиоканалу.

Решение данных вопросов может быть использовано в технике, медицине и научных исследованиях**.**

Библиографический список

1. Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учебное пособие.- Новосибисрк: Изд-во НГТУ, 2002. 352 с.– глава 9.
2. Гонсалес Р.С. «Цифровая обработка изображений в среде MATLAB» 501-530с.
3. Яне Б. Цифровая обработка изображений : пер. с англ. М.: Техносфера, 2007.

УДК 681.5; ГРНТИ 50.43.19

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОНЯТИЯ УПРАВЛЕНИЯ НАЗЕМНЫМИ ВОЗДУШНЫМИ ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ И СРЕДСТВАМИ НАВЕДЕНИЯ ОРУЖИЯ

В.Ф. Васильченков, Р.А. Анашкин

Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище имени генерала армии В.Ф. Маргелова, Россия, Рязань, rem1005@mail.ru

Аннотация. Данная статья содержит мнение авторов о способах описания управляемого движения машины (самолета и т. п.) методами, принятыми в автоматизированных системах и о необходимости их развития.

Ключевые слова: системный подход, экзоскелетальная модель, управляющее действие, теория автоматического управления

SYSTEMATIC APPROACH IN DETERMINING THE CONCEPT OF GROUND AIR VEHICLES AND MEANS OF GUIDED WEAPONS

V.F. Vasilchenkov, R.A. Anashkin

Ryazan Higher Airborne Command School named after Army General V.F. Margelov Russia, Ryazan, rem1005@mail.ru

Abstract. The article contains authors opinions about the ways steering movement and systems development on the system basis.

Keywords: system approach, the exoskeleton model, control action, the theory of automatic control

В задаче создания обобщенной теории управления наземных, воздушных, морских транспортных средств (ТС) и средств наведения оружия, объединенных обобщающим понятием "операторы слежения", предлагается математическая модель (ММ) формирования осведомительной и командной информаций о положении объектов управления (ОУ) в пространстве при функционировании эргатической системы человек-машина (СЧМ) и ее частных систем водитель–машина–дорога (В–М–Д), летчик–самолет–окружающее пространство (Л–С–О) в режиме «слежения» за заданным маршрутом и курсом. Управление машиной рассматривается как, своего рода, наведение в цель, расположенную на расстоянии $S_в$ под углом к оси ТС и водителя.

С точки зрения системного подхода управление следует рассматривать как установление и наполнение конкретным физическим содержанием связей между элементами системы управления на основе осведомительной, командной и управляющей информации: последняя может быть установлена, если известны передаточные функции ОУ и ее составных частей. В качестве образно-понятийной модели (рис. 1) системы управления предлагается экзоскелетальная модель. В ней управление рассматривается как направление туловища оператора, доведенного до размеров автомобиля (в меньшей мере самолета) и их продольной оси в заданную точку R_f своеобразного «прицеливания» на расстоянии $S_в$.

Цель, точки R_f на расстоянии $S_в$ (рис. 2) постоянно следуют впереди ОУ, изменяясь по величине от скорости, условий движения, угловых перемещений поля зрения водителя (летчика, в целом оператора «слежения»).

При этом используются преимущества естественного рефлекторного навыка человека: водитель (летчик), как оператор, расположенный в продольной плоскости движения, отыскивает точку R_f, относительное угловое смещение которой равно нулю, и фронтально ориентирует на нее ось экзоскелетона (водитель с машиной – как одно целое)

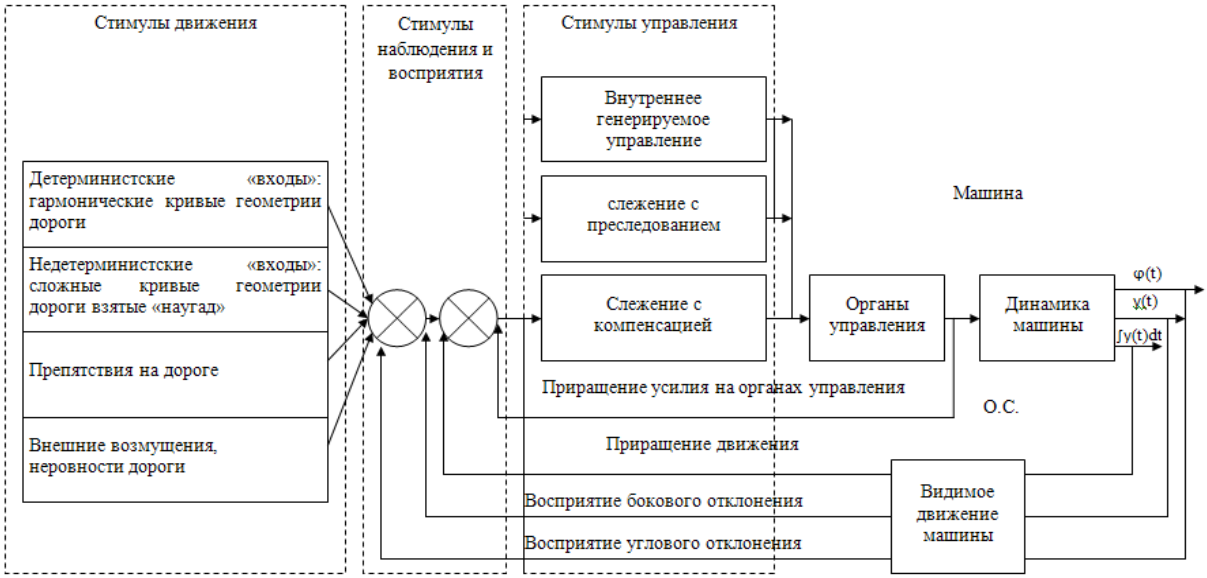


Рис. 1. Структурная схема системы В-М-Д в качестве образно-понятийной модели деятельности водителя

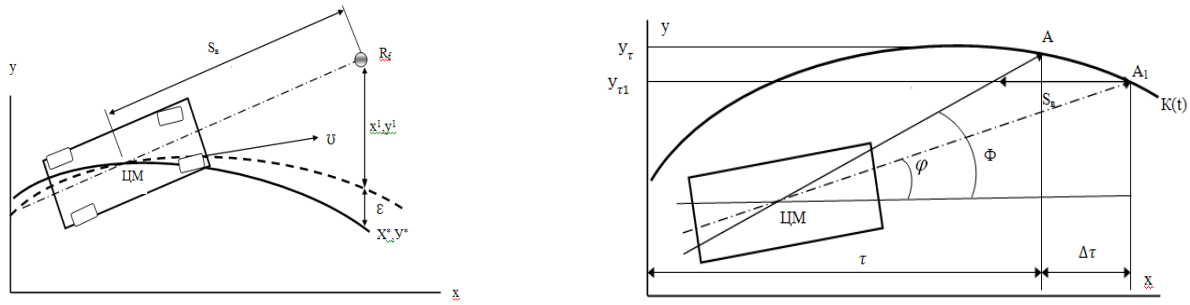


Рис. 2. Схема определения положения ТС типа «Радар»

Организм человека функционально и психологически приспособлен к такому движению. Относительно этой точки производится измерение углового φ, ψ и бокового $У$ - смещений и на этой основе формирование управляющих действий, когда известна реакция ОУ на управляющее действие (таблица 1).

Таблица 1 - Пороговые данные человека по восприятию параметров движения

Отклонение продольной оси, мин.	Отклонение угловой скорости, град./с	Боковое смещение, $У$, м	Боковое ускорение, W_y, м с$^{-2}$	Скорость, м с$^{-1}$	Коэффициент поперечной силы, $\mu = W_y / q$
10-15,0	**≤3,0**	**0,05…0,15**	**0,3**	**0,07**	**0,03**

При отклонении от заданного курса (рис. 4) зрительная перспектива впереди, составленная хордой S, дугой АБВ и величиной h изменяется. Водитель (оператор) воспринимает это изменение и действует штурвалом таким образом, чтобы привести картину впереди себя в соответствие. Для математического выражения этого факта принято его управляющее действие (УД) пропорциональное отклонению χ от дороги, как угол поворота штурвала:

$$\Delta\Theta_{óê}(t) = C_1 x, \qquad (1)$$

где C – пропорциональная постоянная, коэффициент чувствительности системы В-М к отклонению от курса (рис. 3).

Машина на скорости υ , отклоняясь от заданного курса или маршрута (рис. 3, 5), может вернуться на него, если добавит к ранее намеренным управляющим действиям, соответствующим S и ψ , дополнительные, соответствующие ΔS и $\Delta\psi$, тем быстрее, чем больше увеличивается скорость υ и уменьшается динамическая чувствительность системы В-М на поворот штурвала $\alpha_ш$.

Чувствительные элементы человека-оператора «слежения» (водителя, летчика) вырабатывают управляющий сигнал H_t , пропорциональный разнице $\varepsilon_{\acute{O}} = \acute{O}(t) - \acute{o}(t)$,

$$\varepsilon_\varphi = \hat{O}(t) - \varphi(t),\ \varepsilon_\psi = \Psi(t) - \psi(t) \text{ [2].}$$

В системе неподвижных координат $X - Y$, подвижных координат $x - y$, $\hat{O}(t)$, $\varphi(t)$, $\Psi(t)$, $\psi(t)$ движение ТС описывается [3,4] уравнениями продольного и поперечного движения:

$$x = x_0 + \int_0^{\grave{O}} \mu_0 \cdot \cos\varphi \cdot dt; \tag{2}$$

$$y = y_0 + \int_0^{\grave{O}} \mu_0 \cdot \sin\varphi \cdot dt \tag{3}$$

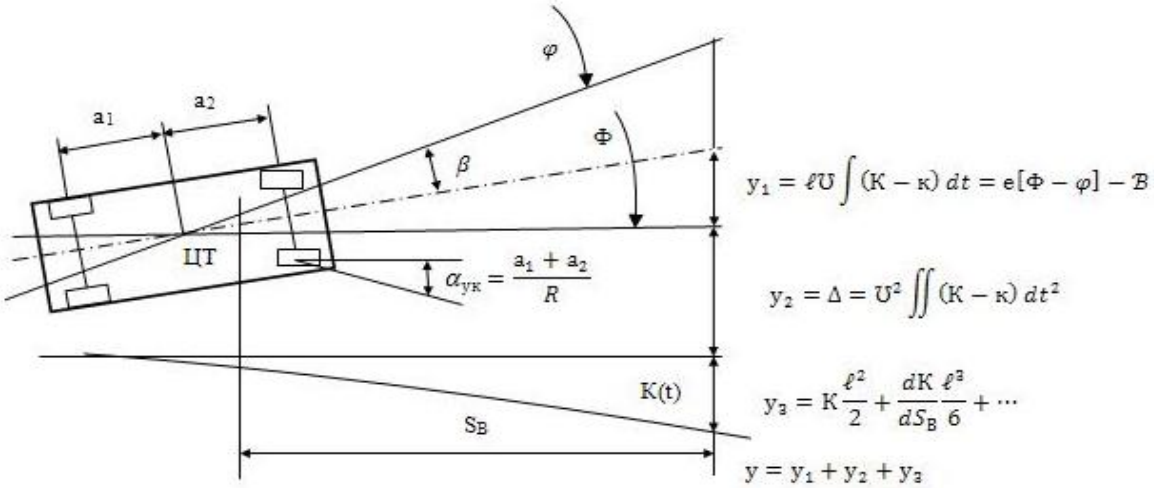


Рис. 3. Структура управления курсовым движением автомобиля

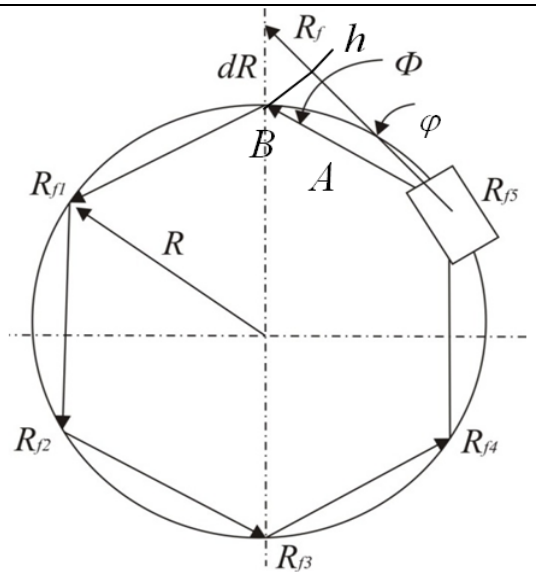


Рис. 4. Закономерности перемещения взгляда водителя при движении по кругу

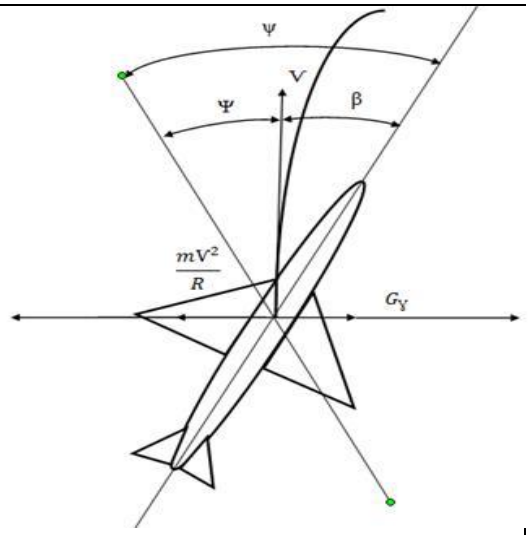


Рис. 5. Структура управления самолетом

На этой основе производится экстраполирование положений ОУ, оценивается ошибка управления, а оператор, как сервомеханизм, действует не только в функции ошибок, но их производных, как показывают наши исследования [3,4]. ОУ оператора должны проектироваться «с убыстрением». При этом следует учитывать влияние весовых констант $К_1 \ldots К_n$. Они должны быть назначены такими, чтобы СУ работала как АСУ.

Таким образом, изоморфизм деятельности человека-оператора в задачах управления курсом (траекторией) движения и систем автоматического управления (САУ) позволяет использовать в исследованиях методы, принятые в теории автоматического управления (Управление самолетом, автомобилем, судном, работа оператора наведения рассматривается как наведение в точку, расположенную на расстояние $S_{\hat{a}}$(*referens point – r.p.*) от объекта управления. При этом эта точка как бы перемещается вместе с объектом управления так, что расстояние $S_в$ изменяется вместе со скоростью (рис. 6).

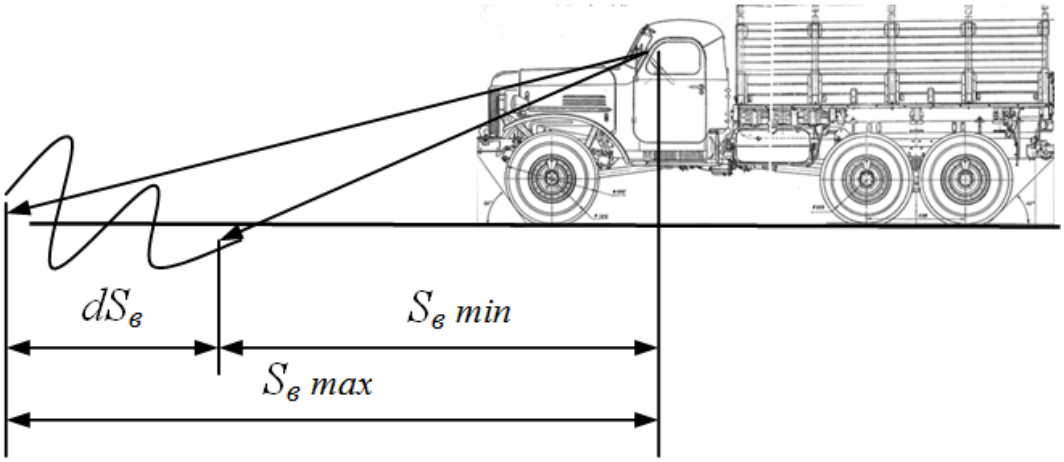


Рис. 6. Щелевой метод определения в функции скорости взгляда водителя
(способ ориентирования водителя на маршруте)

Нами для определения зависимости $S_{\hat{a}} = f(\vartheta_a)$ использовался «щелевой» метод. При этом обзор водителю закрывался так, что оставалась только щель на ветровом стекле в таком положении, при котором водителю было удобно вести автомобиль наиболее комфортно.

Попутно было выявлено, что в разных странах, различающихся степенью автоматизации, расстояния S_r различаются. Так, например, водители в США смотрят дальше, чем водители Европы и России. этот факт вероятно связан с традициями, дорожной обустроенностью, характеристиками машин. Представляют интерес способы, которыми водители-операторы выводят свои объекты управления в заданную точку.

Разработанные нами математические модели такого управления подтверждают тот факт, что водители делают это намеренно.

Дальнейшее развитие настоящего исследования, на наш взгляд, будет способствовать совершенствованию методов и средств обучения вождения.

Библиографический список

1. Адамович Н.В. Управляемость машин (эргономические основы оптимизации рабочего места человека-оператора) [Текст] / Н.В. Адамович. М.: Машиностроение, 1977. – 280 с.
2. Васильченков В.Ф. Современная концепция развития основ теории военной автомобильной техники [Текст] / дис. докт. техн. наук// В.Ф. Васильченков. Рязань: РВВАИ, 2000. – 475 с.
3. Васильченков В.Ф. Военные автомобили. Конструкция и расчет (Эргономические основы проектирования автомобиля как объекта управления)[Текст] /В.Ф. Васильченков. Рязань: Воениздат, 2004. – 660 с.
4. Васильченков В.Ф. Системный подход при определении понятий управления и управляемости автомобиля [Текст] / В.Ф. Васильченков, А.Н. Пахомов, И.В. Чепижко. – Н. Новгород: НГТУ, Известия академии инженерных наук им. А.ЯМ. Прохорова, 2006. – С. 16-20.

УДК 519.7

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ПРОЦЕССА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Д.О. Акимов, С.Л. Яблочников
Московский технический университет связи и информатики,
Россия, Москва, yablochnikov_sl@mtuci.ru

Аннотация. Рассматриваются некоторые аспекты эффективного применения нейронных сетей для осуществления прогнозирования потребления электроэнергии на производственных предприятиях.

Ключевые слова: прогнозирование производственных процессов, экономия технологических ресурсов, математическое моделирование, нейронные сети.

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS TO IMPLEMENT THE PROCESS OF PREDICTING ENERGY CONSUMPTION AT INDUSTRIAL ENTERPRISES

D.O. Akimov, S.L. Yablochnikov
Moscow Technical University of Communications and Informatics,
Russia, Moscow, yablochnikov_sl@mtuci.ru

Annotation. Some aspects of the effective application of neural networks for forecasting electricity consumption in production plants.

Keywords: forecasting production process, saving IT resources, mathematical modeling, neural networks.

В условиях сложной экономической ситуации не только в нашей стране, но во всем мире особо актуальным является проблема экономии и учёта расхода технологических ресурсов на предприятиях. Существует несколько путей ее решения. В частности, достаточно часто ученые и практики, идут по пути математического моделирования процессов производства, с последующей их оптимизацией. Так, подобный подход, был рассмотрен рядом авторов в публикациях [1, 2]. Аналогичные задачи решали также следующие исследователи: В.В. Никитин, С.Н. Поезжалова, С.Г. Селиванов, О.А. Бородкина, К.С. Кузнецова, В.С. Теплов, А.А. Тормышев.

Несколько иной подход к решению упомянутой выше проблемы основан на проектировании, создании и практическом применении автоматизированных систем управления потреблением технологических ресурсов. Результаты подобных исследований, в свое время,

были представлены в публикации [3]. Этим направлением также занимались Л.С. Казаринов и Т.А. Барбасова [4].

В свою очередь, Науменко Д.О., Беловым К.Д., Политовым Е.А., Карякиным А.Л., Казариновым Л.С., Барбасовой Т.А., Колесниковой О.В., Захаровой А.А., Чернецовым В.А., Казаковским Е.Н., Гофманом А.В., Ван Эфеном, Колоколовым М.В. были разработаны средства прогнозирования потребления совокупности технологических ресурсов производственного предприятия, функционирование которых основано на формировании соответствующих моделей [3 – 14].

В конце XX – начале XXI столетия весьма успешно прогнозированием динамики потребления ресурсов занимался целый ряд исследователей, как в нашей стране, так и за рубежом, однако, некоторые вопросы успешного применения на практике их теоретических идей не были достаточно четко проработаны. В частности, не были созданы сервисные программные средства, содержащие пользовательский интерфейс и позволяющие в режиме реального времени обновлять статистику, а, следовательно, корректировать прогноз соответствующих показателей. А это весьма важно для эффективной реализации процессов принятия управленческих решений. Авторы данной статьи ставят перед собой решение указанной выше задачи.

В научной и учебной литературе под прогнозированием понимается определение тенденций и перспектив развития тех или иных процессов на основе анализа данных об их прошлом и нынешнем состоянии [15]. Как правило, различают следующие методы прогнозирования: экспертные, фактографические, комбинированные. Основой экспертных методов является опрос мнения по некоторому вопросу группы компетентных в определенной сфере деятельности специалистов (экспертов). Далее, полученные таким образом данные, обрабатываются по определенным алгоритмам с применением средств компьютерной техники. В результате реализации указанных выше действий, получают соответствующую оценку. В частности, экспертные методы успешно применяются в условиях недостаточной статистики (недостатка информации об объекте исследования). Их преимущество – возможность использования для анализа систем фактически любой природы, функционирующих в различных условиях. Однако подобные методы также обладают рядом недостатков, к ним относятся: невысокая точность прогноза и возможные ошибки экспертов.

Среди фактографических методов выделяют статистические и опережающие. Их основа – сбор информации об исследуемой системе и определение наиболее важных показателей характеризующих ее функционирование и фактическое состояние в определенные моменты времени. Далее синтезируется прогнозная математическая модель. Однако при этом, исследователю необходимо обеспечить баланс между количеством используемых для реализации моделирования и прогноза данных (при их большом количестве модель может быть весьма сложной) и уровнем точности осуществления прогнозирования. В свою очередь, комбинированные методы интегрируют основные возможности реализации прогноза с помощью экспертных и фактографических методов. Автоматизированные системы управления, функционирующие на основе применения комбинированных методов прогнозирования, являются наиболее эффективными. Воплощение на практике таких систем достаточно часто основано на так называемых нейронных сетях.

С. Хайкин даёт следующее определение нейронным сетям: «Это громадный распределённый параллельный процессор, состоящий из элементарных единиц обработки информации, накапливающих экспериментальные знания и предоставляющих их для последующей обработки» [2]. Несколько иначе, трактуют данное понятие Мак-Каллок и Питтс. В частности, в одной из своих публикаций они пишут, что нейронная сеть это – «… математическая модель, а также её программное или аппаратное воплощение, которая построена по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей – сетей живого организма» [3].

Системный анализ научной литературы, реализованный авторами, позволяет утверждать, что использование нейронных сетей для прогнозирования расхода производственных

ресурсов предприятий и организаций является весьма эффективным. Так, к позитивным моментам применения на практике упомянутого выше инструмента прогноза можно отнести:

– устойчивость к шумам, имеющим место во входных данных;

– адаптивность (данный инструмент успешно функционирует в случае, если статистика изменяется с течением времени);

– отказоустойчивость (при повреждении одного нейрона сети, уровень работоспособности системы в целом снижается незначительно);

– высокая точность осуществления прогнозирования (при выполнении ряда условий, в частности, при удачном проектировании и обучении сети).

Однако, для систем, использующих нейронные сети также характерны определенные недостатки. В частности, нужно обеспечить высокий уровень надежности и производительности аппаратной части, реализующей основные расчёты. Кроме того, необходимо накопить достаточно большой объём данных об объекте моделирования, для так осуществления процессов называемого обучения нейронной сети. Указанные выше недостатки, по нашему мнению, вполне возможно компенсировать за счёт применения технологий связанных с облачными вычислениями, и автоматизированных систем обработки информации. В таблице 1 представлена классификация нейронных сетей.

Таблица 1 - Классификация нейронных сетей

Вид архитектуры сети	Тип сети	Преимущества	Недостатки	Область применения
Прямое распространение	Многослойный перцептрон Перцептрон Розенбалта	Простота реализации и обучения. Применимость ко многим практическим задачам	При обучении параметры сети подстраиваются только под одну обучающую выборку	Классификация, распознавание образов, прогнозирование
Прямое распространение	Сеть с радиальной базисной функцией	Высокая скорость обучения	Необходимость подбора параметров функции активации	Классификация, аппроксимация функций многих переменных
Рекуррентные сети	Сеть Хопфилда Сеть Эльмана Сеть Хемминга LSTM сеть	Наличие краткосрочной и долгосрочной памяти в зависимо-сти от типа сети.	Сложность обучения, сложная структура.	Динамическое моделирование, прогнозирование временных рядов
Карты самоорганизации	Сеть Кохонена	Быстрое обучение, возможность визуализации	Проблема мёртвых нейронов	Компрессия данных, кластеризация

Широкое применение нейронные сети получили при прогнозировании потребления технологических ресурсов. Технологические ресурсы – это потребляемые в процессе производства предметы труда, к которым относятся основные и вспомогательные материалы, полуфабрикаты и комплектующие изделия, топливо и энергия на технологические нужды. Указанный термин охватывает достаточно широкую область материальных благ, поэтому, далее мы уделим только лишь одному виду таких ресурсов – электроэнергии, оплата потребления которой является одним из основных видов затрат производственного предприятия.

В настоящее время был проведён целый ряд исследований по применению нейронных сетей для прогнозирования потребления электроэнергии на производстве. Рассмотри ряд научных публикаций, посвященных решению вышеупомянутой задачи. Так, например, Беловым К.Д. был произведен прогноз потребления электроэнергии фабрикой окускования горно-обогатительного комбината методом искусственных нейронных сетей. В данном диссертационном исследовании были поставлены и решены следующие задачи: произведён анализ методов добычи и переработки руды и производственных процессов, затем разработан алгоритм синтеза нейронной сети, который включает в себя определение структуры сети, функции активации нейронов, и синтез отдельной нейросети для каждого отдельно взятого цеха фабрики [7].

Основная идея указанного выше исследования, выполненного, в свое время, Беловым К.Д., заключается в повышении точности реализации прогноза, по сравнению с ранее известными работами. В частности этим автором, была разработана математическая модель процессов потребления электрической энергии фабрикой ОАО «Качканарский Горно-обогатительный комбинат «Ванадий». Также был проведён синтез нейронной сети, путем определения оптимальной структуры и функции активации. Количество нейронов в скрытом слое сети рассчитывалось по формуле $L=L_w / (n+m)$, где m и n – размерность выходного сигнала, L_w – число синаптических весов.

Для обучения нейросети этим исследователем применялся нелинейный метод «Левенберга-Марквардта с учителем», который показал наилучшие показатели сходимости. Необходимо отметить, вероятность ошибки для обучающего множества входными факторами и прогнозируемой величиной составил менее одного процента. Автором также была создана компьютерная программа для автоматизации прогнозирования потребления электроэнергии предприятием в процессе функционирования, алгоритм реализации которой был основан на применении нейронных сетей.

Политовым Е.А. в диссертационном исследовании «Построение моделей долгосрочного прогноза потребления электроэнергии и мощности промышленными предприятиями» [8] были разработаны и проанализированы алгоритмы формирования обучающего множества данных и определения расхода электроэнергии на выработку единицы продукции в условиях неопределенности, обусловленной недостаточностью данных. В частности этот автор утверждает, что нет особой необходимости в прямом измерении потребления электроэнергии каждым отдельно взятым технологическим процессом, реализуемым при функционировании предприятия. В рамках данного исследования автором была синтезирована модель предприятия в виде нейронной сети.

Исходя из синтезированной общей модели производства, Политов Е.А. определил структуру нейронных сетей для каждого цеха. Кроме того, им был реализован анализ моделей долгосрочного прогноза потребления, в результате которого был сделан вывод о том, что для долгосрочного прогнозирования целесообразно использовать сеть с иерархической структурой связей, и включающую в себя, как обратные связи, так и планы выработки продукции» [8].

В качестве примера, реализации краткосрочного прогнозирования потребления электроэнергии с применением нейронных сетей, можно привести диссертационное исследование Вана Ефэна [9]. В данной работе был реализован нейросетевой подход к прогнозированию, исходя из которого, с помощью генетического алгоритма оптимизации «Genetic Algorithm Toolboox пакета MatLab, было определено количество нейронов в сети. Точность прогнозирования оценивалась, как средняя абсолютная ошибка в процентах по следующей формуле

$$MAPE = \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{p}\frac{|y_i - \widehat{y_i}|}{y_i} \times 100\%$$

где y_i – фактическое значение нагрузки, $\hat{y}_i$ – результат прогноза, p – количество данных.

Отличительной особенностью данной работы является наличие прогнозной математической модели, синтез которой основан на применении метода опорных векторов. В ней учтены следующие условия: в случае превышения ошибки прогноза некоторого уровня осуществляется оптимизация модели нейронной сети. Одним из преимуществ технической реализации данной модели является наличие пользовательского интерфейса. Он позволяет адаптировать обучающую выборку и реализовать подбор оптимальных параметров ядерных функций на основе генетических алгоритмов и так называемого «метода роя частиц». Все указанное выше, существенно снижает уровень ошибки прогноза, а также позволяет использовать, разработанные автором средства прогнозирования, в качестве элементов автоматизированной системы поддержки принятия решений.

Гофман А.В. в работе «Моделирование электропотребления многономенклатурного предприятия для краткосрочного прогнозирования» разработал математическую модель почасового потребления электроэнергии, в которой была учтена так называемая «бытовая нагрузка». Модель, предложенная данным автором, имеет следующий вид:

$$Q_з(t) = \sum_{n=1}^{m} Q_n(t) \cdot B_n(t),$$

где $Q_n(t)$ – трудоёмкость отдельной номенклатуры продукции при ее изготовлении данного в течении одних суток или трудоёмкость производственных операций, совершаемых в процессе производства n-го вида продукции в течении одних суток, (нормочас/ед); $B_n(t)$ – объём выпуска номенклатуры, t – период времени, m – количество разных видов продукции.

Задача краткосрочного прогнозирования потребления электроэнергии формализуется Гофманом А.В. следующим образом:

$$P(t_n) = (W(t_{0...}t_{n-1}) + D(t_{0...}t_{n-1})) \cdot K(t) \cdot K(t_з)$$

где $P(t)$ – прогнозируемое значение электропотребления, $W(t)$, $D(t)$ – недельный и суточный тренды, $K(t)$ – корректирующая функция, учитывающая температуру окружающей среды, $K(t_з)$ – корректирующая функция, учитывающая изменения технологического процесса.

Для прогнозирования автором была использована нейронная сеть прямого распространения с усовершенствованной структурой. В результате использования такой модели, было достигнуто существенное снижение уровня ошибки краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии производственным предприятием в процессе функционирования.

Таким образом, нами был произведен анализ научной литературы, содержание которой касается практического применения нейронных сетей для осуществления прогнозирования потребления электрической энергии производственным предприятием в процессе его функционирования. В частности, рассмотрены общие принципы разработки нейронных сетей, а также осуществлена попытка классификация их типов. Оценены также преимущества и недостатки отдельных вариантов реализации. На основании анализа ряда диссертационных исследований по соответствующей тематике нами сделан вывод о перспективности практического использования нейронных сетей, как для долгосрочного, так и для краткосрочного прогнозирования потребления технологических ресурсов предприятиями. Их применение позволяет снизить вероятность ошибок прогнозирования [16].

Библиографический список

1. Поезжалова С. Н., Селиванов С. Г., Бородкина О. А., Кузнецова К. С. **Р**екуррентные нейронные сети и методы оптимизации проектных технологических процессов в АСТПП машиностроительного производства // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2011. №5.
2. Селиванов С.Г., Никитин В.В., Теплов В.С., Тормышев А.А. Логико-генетический метод оптимизации АСТПП авиадвигателестроения в условиях управления проектами «Бережливого» производства // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. №3.
3. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А. Система управления энергетическими потоками в теплоэнергетическом комплексе металлургического предприятия // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2012. №23.
4. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А., Колесникова О.В., Захарова А.А. Метод прогнозирования электропотребления промышленного предприятия // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2014. №1.
5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1013 с.
6. Мак-Каллок У. С., Питтс В. Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности // Автоматы / Под ред. К. Э. Шеннона и Дж. Маккарти. – М.: Изд-во иностр. лит., 1956. С. 363–384.
7. Белов К.Д. Прогнозирование потребления электроэнергии фабрикой окускования горно-обогатительного комбината методом искусственных нейронных сетей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. Магнитогорск, 2008.
8. Политов Е.А. Построение моделей долгосрочного прогноза потребления электроэнергии и мощности промышленными предприятиями: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. Кемерово, 2012. 147 с.

9. Ван Ефэн. Методология совершенствования систем краткосрочного прогнозирования электропотребления: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами. Спб., 2013. 135 с.
10. Гофман А.В. моделирование электропотребления многономенклатурного предприятия для краткосрочного прогнозирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. Самара, 2013.
11. Колоколов М.В. модели и алгоритмы прогнозирования для поддержки принятия решений при управлении электропотреблением промышленных предприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. Саратов, 2013.
12. Чернецов В. И., Казаковский Е. Н. Прогнозирование потребления электрической энергии с использованием нейронных сетей // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2006. №1.
13. Науменко Д.О. Разработка комплекса моделей долгосрочного прогнозирования потребления электроэнергии в КНР // Управление экономическими системами: электроннный научный журнал. 2011. №34.
14. Карякин А. Л., Дегтярёв Е. А. Прогнозирование потребления электроэнергии цехом агломерации на основе метода искусственных нейронных сетей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. №12.
15. Владимирова Л.П. Прогнозирование и планирование в условиях рынка: Учеб. пособие. М.: Издательский Дом «Дашков и Ко», 2001. 390с.
16. Яблочников С.Л. Использование принципа моделирования при создании различных уровней управляемых проектов / П. Доуцек, С.Л. Яблочников // Материалы симпозиума с международным участием «Наука и предпринимательство».– Винница-Львов.– 1994. – С.24 – 25.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.35

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ

М.С. Мальченко, А.А. Селяев
Рязанский государственный радиотехнический унивверситет,
Россия, Рязань, malchenkomaks@mail.ru

Аннотация. В работе проводится исследование модифицированного алгоритма слежения за движущимся объектом, основанного на использовании некоторого эталонного изображения объекта. Рассматривается ситуация частичного искажения изображения объекта в текущем кадре видеопоследовательности. Дается оценка эффективности предлагаемого алгоритма в различных ситуациях. Намечаются направления совершенствования данного алгоритма.
Ключевые слова: корреляционно-экстремальные алгоритмы, слежение за объектом, исследование алгоритмов

MODIFIED CORRELATION-EXTREMAL ALGORITHM FOR MOVING OBJECT COORDINATES DETERMINING IN VIDEO IMAGES SEQUENCE

M.S. Malchenko, A.A. Selyaev
Ryazan state radiotechnichal university,
Russia, Ryazan, malchenkomaks@mail.ru

Abstract. The paper attempts to research the modified algorithm for tracking a moving object, based on the object reference image usage. We consider the situation of object image partial distortion in the current frame of the video sequence. Assesses the effectiveness of the proposed algorithm in different situations. Suggests areas for the algorithm.
Keywords: correlation-extremal algorithm, object watching, algorithm research.

Одной из задач обработки изображений является автоматическое слежение за движущимися объектами на последовательности изображений. Решение данной задачи осложняется из-за наличия различных возмущающих воздействий при наблюдении за объектом, например, перепадов освещения, шума на видеопоследовательности и других эффектов. Кроме того, препятствовать слежению за объектом могут другие объекты фоноцелевой обстановки. Например, объект слежения может быть частично заслонен другим объектом, что может способствовать срыву наблюдения.

В докладе рассматривается модифицированный корреляционно-экстремальный алгоритм (модуль разности) [1, 2], призванный обеспечить устойчивое слежение за объектом при его частичном заслонении другими объектами:

$$F(\alpha,\beta)=\sum_{i,j\in H}(\left|l(i+\alpha,j+\beta)-h(i,j)\right|*p(i,j)+m*(1-p(i,j))),$$

где

$$l(i+\alpha,j+\beta)$$

– элемент текущего изображения,

$$h(i,j)$$

– элемент эталонного изображения объекта,

$$p(i,j)=\begin{cases}1,\left|l(i+\alpha,j+\beta)-h(i,j)\right|<T\\0,\left|l(i+\alpha,j+\beta)-h(i,j)\right|\geq T\end{cases},$$

T – задаваемый порог,

$$m\in[0,100]$$

– задаваемая величина штрафа, значение яркости пикселя находится в диапазоне [0, 255].

Блок-схема для данного алгоритма показана на рисунке 1.

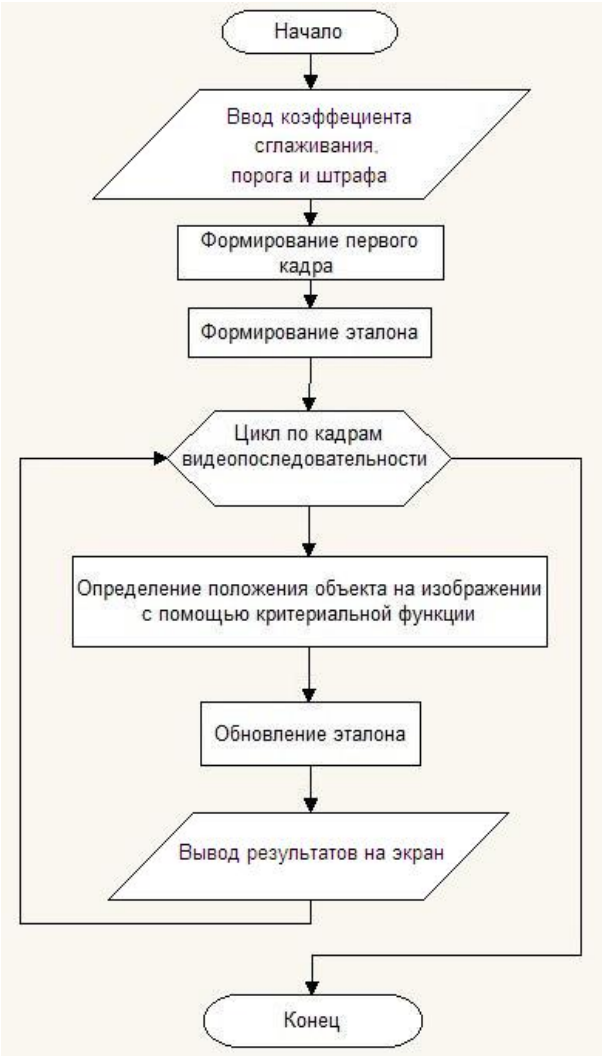


Рис. 1. Блок-схема модифицированного корреляционно-экстремального алгоритма

Часть области поиска, для которой значение критериальной функции окажется минимальным, принимается за изображение наблюдаемого объекта на текущем кадре. При расчете значения критериальной функции данный алгоритм не учитывает точки (пиксели) рассматриваемой части области поиска, яркость которых слишком сильно отличается от яркости соответствующих точек эталонного изображения (абсолютное значение разности яркостей превышает заданный порог T): считается, что такие точки принадлежат заслоняющему объекту. Чем больше точек изображения отбрасывается, тем меньше информации используется для определения положения объекта на изображении – тем менее достоверны результаты. В случае, когда не учитывается слишком много точек, критериальная функция может принять ложное минимальное значение. Для того, чтобы снизить вероятность этого события, за каждую отброшенную точку к итоговому значению критериальной функции прибавляется задаваемый штраф m.

Чтобы повысить устойчивость алгоритма к возмущающим воздействиям и изменениям изображения объекта вследствие его приближения или поворота, производится постоянная корректировка эталонного изображения, а именно, получение усредненного изображения объекта с помощью предыдущего эталонного изображения и изображения объекта на текущем кадре.

Пример работы алгоритма для случая заслонения 20% точек объекта и значении порога 87 показан на рисунке 2. График зависимости процента отброшенных точек от номера кадра показан на рисунке 3.

Рис. 2. Пример работы алгоритма для случая заслонения 20% точек объекта и значении порога 87

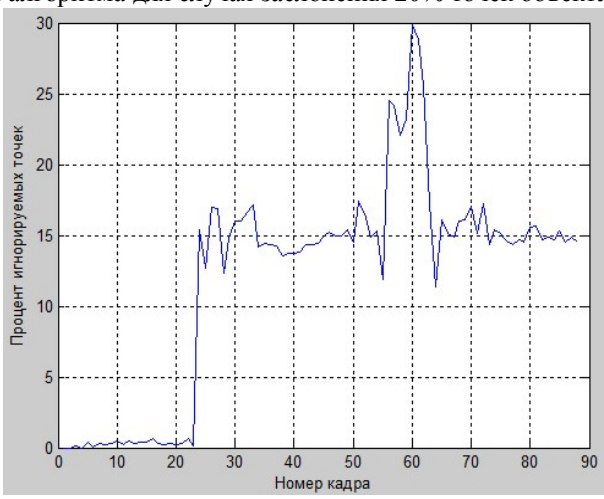


Рис. 3. График зависимости процента отброшенных точек от номера кадра для случая заслонения 20% точек объекта и значении порога 87

В таблице 1 показано, произошла ли потеря объекта слежения при различных значениях порога (отложены по вертикали) и дисперсии шума (отложены по горизонтали) для случая заслонения 20% точек объекта, а в таблице 2 – максимальная ошибка слежения по координатам x и y (x/y) при тех же условиях.

Таблица 1 - Возникновение события потери слежения для случая заслонения 20% точек объекта

T \ V	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005
80	да	да	да	да	да
85	нет	нет	нет	нет	да
90	нет	нет	нет	нет	нет

Таблица 2 - Максимальная ошибка слежения по координатам x и y для случая заслонения 20% точек объекта

T \ V	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005
80	82/18	89/19	82/19	82/19	95/22
85	28/6	37/7	20/7	18/8	68/14
90	4/3	5/3	4/4	6\6	9/5

Также в докладе рассматривается возможность повышения точности алгоритма путем использования дополнительной информации о наблюдаемом объекте в виде его границ. Для получения границ на изображении необходимо найти его первую производную, например, с помощью масок Робертса, Превитта или Собеля.

Выводы

С помощью экспериментальных исследований, в которых использовались несколько различных видеопоследовательностей, было показано, что данный алгоритм может хорошо справляться со своей задачей. Вместе с тем, его эффективность во многом зависит от правильного задания величин порога *T* и штрафа *m* для конкретной фоноцелевой обстановки. Также показаны достоинства и недостатки использования границ объекта наблюдения в качестве дополнительной информации для алгоритма. Разработка методики выбора порога *T* и штрафа *m* может быть одним из направлений совершенствования данного алгоритма.

Библиографический список

1. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.Е. Степашкин. – М.: Радиотехника, 2008. – 176с.: ил.
2. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения / В.К. Баклицкий – Тверь: ТО «Книжный клуб», 2009. – 360 с.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.35

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ОПТИЧЕСКОГО ПОТОКА

А.С. Тюнин
Рязанский государственный радиотехнический университет
Россия, Рязань, alex.tunin1993@yandex.ru

Аннотация. В данной работе описана реализация алгоритма обнаружения и оценки параметров движущихся объектов на основе метода оптического потока для систем видеослежения в реальном времени. Проводится сравнительный анализ эффективности обнаружения движущихся объектов с применением методов Лукаса-Канаде и Хорн-Чанка.

Ключевые слова: методы оптического потока, метод Лукаса-Канаде, метод Хорн-Чанка.

DETECTION AND PARAMETERS ESTIMATION OF MOVING OBJECTS BASED ON OPTICAL FLOW

A. Tyunin
Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, alex.tunin1993@yandex.ru

Abstract. This paper describes the optical flow based moving object detection and parameters estimation alghorithm. Comparative analysis of effectiveness and computation productivity the variants based on Lucase-Kanade and Horn-Schunck method has been performed.
Keywords: optical flow, Lucas-Kanade method, Horn-Schunck method.

1. Введение

Интеллектуальные системы обработки и анализа видеоинформации интенсивно применяются в различных областях человеческой деятельности. Например, для охраны частной собственности и промышленных объектов, наблюдения за тяжелобольными людьми, в научных исследованиях, для наблюдения на транспорте, охраны мест массового скопления людей и т.д.

Прогресс в области создания систем обнаружения и сопровождения объектов до недавнего времени сдерживался, в частности, недостаточной производительностью средств вычислительной техники. С увеличением быстродействия процессоров стало возможным обрабатывать цифровые видеоданные в реальном времени и сохранять архив для постсобытийного просмотра. Появились новые области применения, такие как: распознавание номеров автомобилей, обнаружение и распознавание лиц. Одним из важных элементов современных систем видеонаблюдения является видеодетектор движения, который обеспечивает автоматическое обнаружение движущихся относительно фона объектов в потоковом видео. Так, при появлении человека или иного движущегося объекта в поле зрения неподвижной камеры, видеодетектор подает сигнал на пульт охраны или на устройство видеозаписи.

Работу системы автоматического обнаружения и сопровождения объектов можно охарактеризовать последовательным переходом от операций обработки и анализа последовательностей изображений к обработке параметров объектов, а затем и к формированию сигналов управления. В процессе обнаружения и оценки параметров движущихся объектов выделяют следующие уровни обработки информации: восстановление изображений, выделение сегментов, слежение за объектами, оценка параметров объектов, обнаружение объектов, распознавание объектов, сопровождение объектов [1].

2. Методы оптического потока

Оптический поток (ОП) – изображение видимого движения, представляющее собой сдвиг каждой точки между двумя изображениями. По сути, он представляет собой поле скоростей (т.к. сдвиг с точностью до масштаба эквивалентен мгновенной скорости). Суть ОП в том, что для каждой точки изображения находится такой сдвиг, чтобы исходной точке соответствовала точка на втором изображении.

Выделяют такие методы вычисления оптического потока, как:

- Фазовая корреляция [2] — инверсия нормализованного перекрестного спектра.
- Блочные методы — минимизация суммы квадратов или суммы модулей разностей.
- Дифференциальные методы оценки оптического потока, основанные на частных производных сигнала.
- Алгоритм Лукаса-Канаде [3] — рассматриваются части изображения и аффинная модель движения.
- Алгоритм Хорн-Чанка [4]— минимизация функционала, описывающего отклонение от предположения о постоянстве яркости и гладкость получаемого векторного поля.
- Buxton–Buxton — основан на модели движения границ объектов в последовательности изображений.
- Общие вариационные методы — модификации метода Хорн-Чанка, использующие другие ограничения на данные и другие ограничения на гладкость.

- Дискретные методы оптимизации — поисковое пространство квантуется, затем каждому пикселю изображения ставится в соответствие метка таким образом, чтобы расстояние между последовательными кадрами было минимальным. Оптимальное решение часто ищется с помощью алгоритмов нахождения минимального разреза и максимального потока в графе, линейного программирования [5].

3. Алгоритм обнаружения и оценки движущихся объектов с помощью оптического потока

В данном пункте подробнее рассмотрим разработанный алгоритм обнаружения и оценки параметров движущихся объектов с помощью оптического потока. Он состоит из следующих шагов:

1. Считываем очередной видеокадр.
2. Чтобы оценить оптический поток, преобразуем цветное RGB изображение в полутоновое. Затем используем один из методов вычисления оптического потока, который возвращает матрицу скоростей.
3. Векторы оптического потока хранятся в виде комплексных чисел: вещественная часть - это проекция скорости на ось Y, а мнимая – проекция на ось X. Вычисляем модуль вектора скорости, который в дальнейшем будет использоваться для пороговой обработки.
4. Требуется выделить только области с достаточно заметным движением. В то же время шумы и локальные изменения могут приводить к небольшим, однако ненулевые значениям скорости в отдельных пикселях. С помощью усредняющих фильтров вычисляем пороговую величину модуля скорости. Выполняем пороговую обработку матрицы скоростей и выделяем области с существенным движением.
5. В результате пороговой обработки будут иметь место ошибки. Часть точек может ошибочно рассматриваться как объект, другая – ошибочно рассматриваться как фон. Чтобы устранить ошибки, используем двумерную медианную фильтрацию и морфологическую обработку. Вначале применяем морфологическую эрозию для удаления малых шумовых объектов, затем морфологическое закрытие, которое «закрывает» небольшие внутренние отверстия и сглаживает края выделенных областей.
6. В результате морфологической обработки будет получена связная область – сегмент, которая определяет местоположение движущегося объекта. Далее оцениваем площадь и ограничительную рамку сегмента.
7. Так как положение камеры относительно сцены обычно известно, мы можем отфильтровать по размеру найденные объекты, заведомо не являющиеся автомобилями. Таким образом, мы можем посчитать, сколько автомобилей находится одновременно в кадре.

Изображения, получаемые на различных этапах работы предложенного алгоритма приведены на рисунке 1.

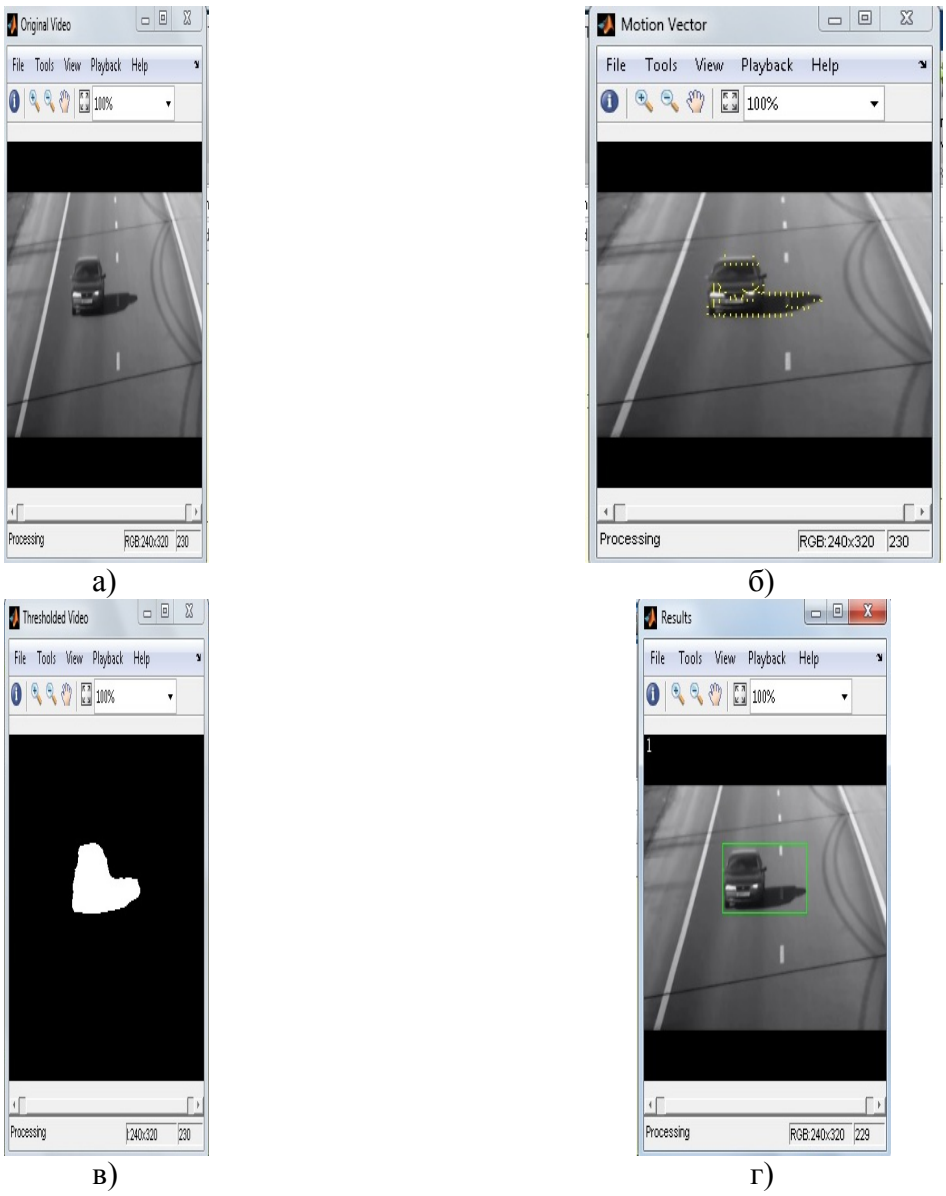


Рис. 1. Изображения, получаемые на разных этапах работы алгоритма: а) – исходное полутоновое изображение; б) – кадр с отфильтрованными векторами скорости; в) – результат сегментации и морфологической обработки; г) – изображение объекта с ограничивающим прямоугольником

4. Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования разработанного алгоритма

В данном разделе сравним эффективность работы алгоритма выделения движущихся объектов при использовании в качестве базовых подходов к вычислению оптического потока методов Лукаса-Канаде и Хорн-Чанка. В процессе исследования была проведена серия экспериментов, в рамках которой наряду с методами вычисления оптического потока варьировались различные параметры алгоритма: задержка между опорными кадрами, мультипликативный коэффициент при пороговой обработке, размеры и форма структурирующих элементов в морфологических операциях открытия и закрытия. Помимо этого были выполнены эксперименты по обработке видеосюжетов искаженных аддитивным нормальным шумом.

Из проведенных экспериментов можно заключить, что применение метода Хорн-Чанка позволяет с большей точностью выделять движущиеся объекты, но метод Лукаса-Канаде работает значительно быстрее. Исследования скорости работы предложенного алгоритма проводились на ПЭВМ Intel® Core™ i7-3517U CPU 1,9 ГГц, 6 Гб ОЗУ, Windows x64. При обработке 176 кадров видеосюжета с разрешением кадра 320x240 элементов скорость обработки при использовании метода Хорн-Чанка составила примерно 12 кадров/с; при при-

менении метода Лукаса-Канаде – примерно 18 кадров/с. Таким образом, метод Лукаса-Канаде обеспечивает рост производительности примерно на треть при сопоставимом качестве выделения объектов.

Таким образом, результаты измерения средней скорости обработки кадра и качества выделения движущихся объектов в различных условиях показывают, что предложенный алгоритм может использоваться при создании систем обработки видеоизображений, функционирующих в реальном масштабе времени.

Работа выполнена на средства гранта Президента РФ для государственной поддержки Ведущих научных школ НШ-7116.2016.8 под науным руководством А.Б. Фельдмана.

Библиографический список

1. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Системы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений в управлении.- М.: Радиотехника, 2008, с. 15-17.
2. Reddy B. S., Chatterji B. N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration //IEEE transactions on image processing. – 1996. – Т. 5. – №. 8. – С. 1266-1271.
3. Lucas B. D. and Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision \\ Proceedings of Imaging Understanding Workshop. – 1981. – pp. 121-130
4. Horn B. K. P., Schunck B. G. Determining optical flow //Artificial intelligence. – 1981. – V.17. – №1-3. – С.185-203.
5. Glocker B. et al. Dense image registration through MRFs and efficient linear programming //Medical image analysis. – 2008. – V.12. – №. 6. – С. 731-741.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ПОРОГОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВЫДЕЛЕНИЯ ОБЪЕКТА В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВИДЕОКАДРОВ

С.А. Галкин, А.А. Селяев
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Российская Федерация, Рязань, sergey.galkin993@gmail.com

Аннотация. В работе рассмотрено использование различных вариантов методов пороговой обработки для выделения движущихся объектов в последовательности изображений. Поясняются особенности алгоритмов пороговой обработки. Приводятся результаты экспериментального исследования алгоритмов на созданных тестовых видео с разными условиями окружающего фона. Формулируются выводы о возможности применения алгоритмов пороговой обработки для обнаружения движущихся объектов на сложном фоне.

Ключевые слова: пороговая обработка, бинаризация, последовательность изображений

RESEARCH OF ALGORITHMS THRESHOLD IMAGE PROCESSING FOR SOLVING THE PROBLEM OF SELECTING AN OBJECT IN A VIDEO SEQUENCE

S.A. Galkin, A.A. Selyaev
Ryazan State Radio Engineering University,
Russian Federation, Ryazan, sergey.galkin993@gmail.

Abstract. In this work discusses the use of various variants of methods of threshold processing to highlight moving objects in image sequences. Explains the characteristics of the algorithms are thresholding. Presents the results of experimental study of algorithms on created test videos with different conditions surrounding background. Formulated conclusions about the possibility of application of algorithms of thresholding to detect moving objects against a complex background.

Keywords: thresholding, binarization, image sequence

1. Введение

В настоящее время при решении многих практических задач используются системы компьютерного зрения. Системы видеонаблюдения широко применяются для обеспечения безопасности на различных территориях (вокзалы, аэропорты, торговые и промышленные комплексы и т.д.) для выделения и обнаружения различных объектов. Автоматизированные

системы управления процессами (роботы, системы помощи водителю) используют методы визуального анализа изображений или видео в процессе принятия решений.

Одним из способов обработки изображений является пороговая обработка. Пороговая обработка – разбиение изображения на две области, одна из которых содержит все пиксели со значением ниже порога, а другая содержит все пиксели со значением выше этого порога.

Этот метод занимает важное место в задачах сегментации изображений. Сегментация изображений – разделение изображения на сегменты, то есть на ряд составляющих его областей [1]. Точки каждой из областей обладают некоторыми общими свойствами, которые позволяют рассматривать их как одну область. В ходе сегментации всем точкам результирующего изображения, принадлежащим одному классу, присваивается одно и то же значение.

Несмотря на то, что при сегментации изображения обычно ставится задача классифицировать точки лишь одного текущего изображения, при решении задач могут использоваться изображения, полученные в предыдущие моменты времени. Следовательно, исходными данными для сегментации может быть и последовательность кадров [1].

При решении задач обнаружения и сопровождения объектов сегментация часто используется для предварительной классификации точек наблюдаемого изображения.

2. Методы пороговой обработки

Пороговая обработка один из основных методов сегментации изображений. Этот метод ориентирован на обработку изображений, отдельные однородные области которых отличаются средней яркостью. Операция пороговой обработки заключается в сравнении значения уровня яркостей пикселей изображения с установленным значением порога. Наиболее распространенным методом сегментации с использованием пороговой обработки является бинарная сегментация. В процессе бинаризации полутоновое изображение, имеющее некоторое количество уровней яркости, преобразуется в черно-белое изображение, пиксели которого имеют только два значения – 0 и 1.

Бинаризация с нижним порогом является наиболее простой операцией, в которой используется только одно значение порога:

$$f_1(x,y) = \begin{cases} 0, f_0(x,y) \geq t; \\ 1, f_0(x,y) < t, \end{cases}$$

где t – порог, f_0 - исходное изображение. Пикселям изображения, значение яркости которых выше порога, присваивается 0, ниже порога присваивается 1. Уровни 0 и 1 играют роль меток. По ним определяют, к какому классу отнести данную точку: к H_0 или к H_1. Или говорят, что H_0 состоит из точек фона, а H_1 из точек объекта.

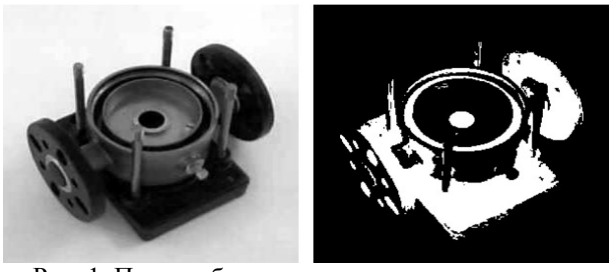


Рис. 1. Пример бинаризация с нижним порогом

1) Метод глобальной пороговой обработки основан на анализе гистограммы изображения. Суть этого метода состоит в разделении гистограммы изображения на две части с помощью одного глобального порога t.

Определение значения порога с помощью гистограммы яркостей является простым методом, позволяющим добиться «чистой» сегментации, если гистограмма изображения носит четко выраженный бимодальный характер [2]. Подобная форма гистограммы означает, что на изображении можно различить два вида сравнительно часто встречающихся пикселей

– яркие и темные. При этом гистограмма легко делится с помощью одиночного глобального порога t, расположенного между пиками гистограммы.

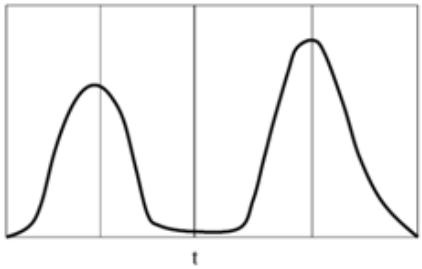


Рис. 2. Гистограмма яркости, допускающая разделение с помощью одиночного глобального порога

Сегментация выполняется путем сканирования исходного изображения, каждому пикселю которого присваивается один из классов, в зависимости от того, превышает ли яркость данного пикселя значение порога t или нет. Успешность использования метода зависит от того насколько хорошо гистограмма поддается разделению.

Недостаток алгоритма заключается в том, что гистограмма редко поддается простому разделению и в большинстве реальных изображений такой подход не дает хороших результатов.

2) Одним из разновидностей методов, основанных на анализе гистограмм, является локальная пороговая обработка, этот метод значительно отличается от глобального алгоритма, является более сложным и дает лучшие результаты. Данный метод используется в основном тогда, когда гистограмма не поддается разделению с помощью единого глобального порога.

Для решения данной проблемы изображение разделяется на отдельные подобласти, в каждой из которых используется свое значение порога. Разумеется, в таком случае помимо проблемы выбора порога появляется новая проблема: как разбить исходное изображение и как на каждой области выбрать свой порог. Так как порог, применяемый для каждого пикселя, оказывается зависящим как от характеристик подобласти изображения, которая содержит данный пиксель, так и от его пространственного расположения, то такое пороговое преобразование является локальным.

Недостатком такого подхода является более длительная работа по сравнению с глобальной пороговой обработкой и невозможность автоматического выбора параметров. Достоинством локальной пороговой обработки является то, что этот метод хорошо подходит для зашумленных изображений, для изображений, имеющих низкое качество, для изображений, характеризующихся сложной структурой фона, для изображений, яркости фона которых в различных местах достаточно сильно различаются.

3) В соответствии с [3] если порог t зависит от характеристик подобласти, то такая обработка называется адаптивной. Естественно встает вопрос о том, какую же зависимость представляет собой порог t от этих характеристик.

Как уже рассматривалось выше в локальной пороговой обработке, существуют сильно зашумленные изображения, которые невозможно обработать как изображение в совокупности, поэтому его разбивают на подобласти. Однако в локальной пороговой обработке решение о принадлежности пикселя, к какому-либо из классов принималось на анализе данных о пространственном положении этого пикселя. Но было напрямую неважно, какие по соседству с ним пиксели находятся, и какой характеристикой они обладают.

В качестве примера приведем метод Бернсена [4]. Метод базируется на идее сопоставления уровней яркости преобразуемого пикселя со значениями локальных средних, вычисленных в его окружении. Пиксели обрабатываются поочередно путем сравнения их интенсивности со средними значениями яркости в окнах размерности $(2K+1)\times(2K+1)$, с центрами в точках $P_l(l=0,1,...,7)$ (рис. 3).

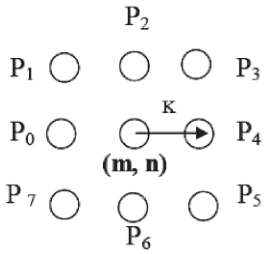


Рис. 3. Преобразование пикселя

Тогда P считается пикселем класса H_0, если у него стоит метка 0, и пикселем класса H_1, если у него стоит метка 1. То есть P становится пикселем H_1 тогда, когда для всех $l = 0,1,.., 7$ выполняется условие:

$$\hat{P}_l - f(m, n) > t,$$

где t играет роль порогового значения, а $\hat{P}_l$ средняя локальная яркость, определяемая по формуле:

$$\hat{P}_l = \frac{1}{(2K+1)\times(2K+1)} \times \sum_{-K \le i, j \le K} (f(m_l + i, n_l + j),$$

где $f(m_l, n_l)$ – яркость в точке P_l с координатами (m_l, n_l).

Данный алгоритм позволяет выполнить сегментацию для изображений, содержащих шум, зависящих от чувствительного сигнала, изображений, имеющих сложную структуру фона или же малый контраст, и при этом практически без потерь полезной информации.

3. Анализ работы алгоритмов

Для анализа алгоритмов на языке MATLAB была разработана программа, реализующая вышеописанные методы пороговой обработки, с возможностью автоматического нахождения порогового значения и добавления различных шумов.

В качестве тестовых видеопоследовательностей использовались разработанные с помощью графического движка «Unreal Engine 4» видеосюжеты с различными движущимися объектами и изменяющимся освещением.

Рис. 4. Раскадровка одного из видеосюжетов

Методика проведения исследований: для каждого алгоритма пороговой обработки проводится исследование на разработанных видеосюжетах с автоматическим поиском порога и различными параметрами для локальной и адаптивной пороговой обработки, с последующим добавлением различных шумов.

На рисунках ниже представлены примеры работы алгоритмов пороговой обработки.

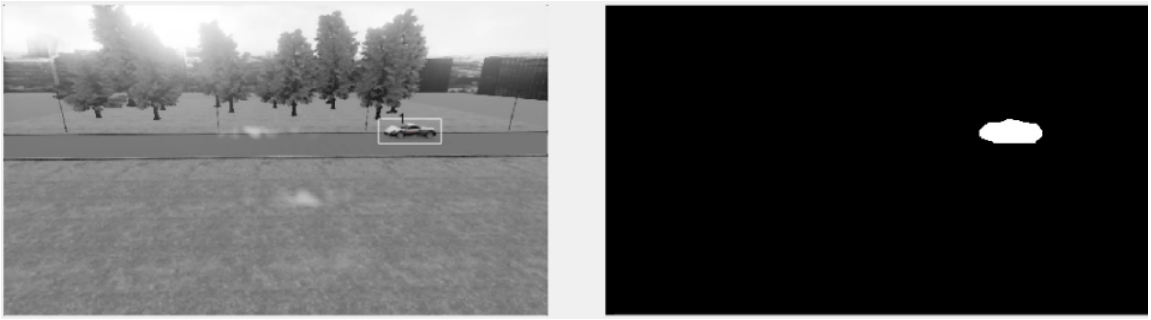


Рис. 5. Пример работы алгоритма глобальной пороговой обработки

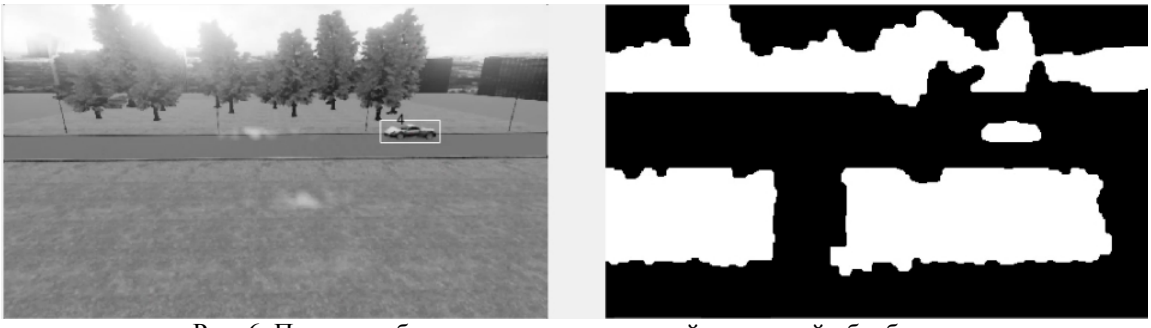


Рис. 6. Пример работы алгоритма локальной пороговой обработки

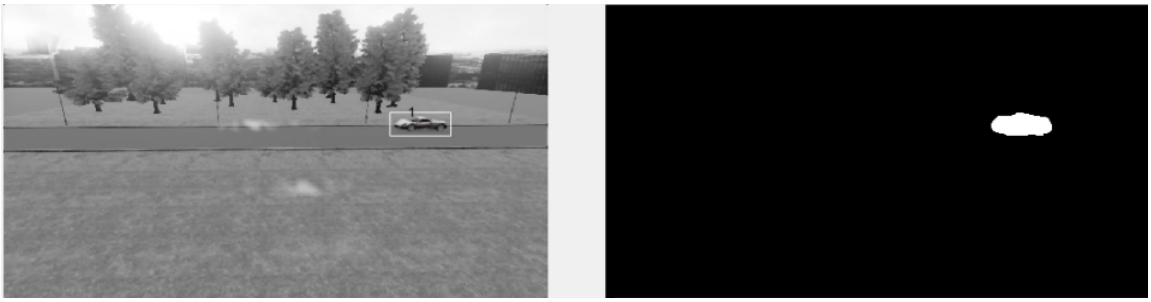


Рис. 7. Пример работы алгоритма адаптивной пороговой обработки

По рисунку 6 видно, что на данном видеосюжете локальная пороговая обработка из-за своих особенностей работает не очень хорошо, после бинаризации присутствуют лишние объекты, в то время как глобальная и адаптивная пороговая обработка справляются с поставленной задачей.

Выводы

Проведенные исследования показали, что алгоритмы пороговой обработки могут использоваться для обнаружения движущихся объектов в последовательности видеокадров. Все алгоритмы хорошо работают в условиях не изменяющегося фона. В случае изменяющегося фона неплохо себя показали глобальная и адаптивная пороговая обработки. Также при правильном подборе параметров адаптивная пороговая обработка хорошо работает с зашумленными изображениями.

Библиографический список

1. Алпатов Б.А. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин. – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.
2. Вудс, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Вудс, Р. Гонсалес. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2005. – 1072 с.Secure Data Card IP Core. Altera Corporation - University Program. 2014.
3. Визильтер, Ю.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения/ Ю.В. Визильтер [и др.]. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.
4. Мищенко В.А., Коробкин А.А. Предварительная обработка изображения в процессе распознавания текста [Электронный ресурс] / В.А. Мищенко, А.А. Коробкин. – Режим доступа: http://cyberleninka.ru/article/n/predvaritelnaya-obrabotka-izobrazheniya-v-protsesse-raspoznavaniya-teksta.pdf

УДК 519.711; ГРНТИ 50.43.17

ПОСТРОЕНИЕ ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ПУТЕМ ПЕРЕОБОРУДОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

А.И. Бобиков, М.М. Борисов
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, maximborrr@yandex.ru

Аннотация. Предлагается метод приближения цифрового закона управления к непрерывному закону управления, в случае, если непрерывный закон управления не может быть найден в аналитическом (замкнутом) виде.

Ключевые слова: дискретное управление, цифровые регуляторы, закон управления.

CONSTRUCTION OF DIGITAL CONTROLLERS BY CONVERSION OF CONTINUOUS CONTROLLERS

A.I. Bobikov, M.M. Borisov
Ryazan State Radioengineering University,
Russia, Ryazan, maximborrr@yandex.ru

Abstract. A method for the approximation of the law of digital control for continuous control law, if the continuous control law can not be found in the analytical (closed) form.

Keywords: discrete control, digital controllers, control law.

1. Введение

В последние годы, можно отметить существование тенденции развития новых методов синтеза в области дискретных нелинейных систем управления. Популярность таких систем можно объяснить как развитием цифровых вычислительных машин в целом, так и преимуществами работы с цифровыми сигналами. Дискретные системы широко применяются в различных отраслях жизнедеятельности человека, начиная от простейших встроенных систем и заканчивая новейшими комплексами управления целыми производствами. Для нахождения решения задач дискретного управления используются различные методы. Стоит отметить, что в последнее время в отношении теории нелинейного управления в дискретном времени были сделаны существенные сдвиги. Практические исследования в этой области основаны на аппроксимации дискретной модели. Одна из наиболее часто используемых видов аппроксимации — аппроксимация Эйлера [5], являющаяся относительно простой в реализации. Но свойства устойчивости регулятора, который был создан на основе такой аппроксимации, как правило, не гарантируют устойчивость дискретной системы.

Существуют методы [7], позволяющие получить дискретный закон управления близкий к непрерывному, путем переоборудования непрерывного регулятора. Также существует другой способ, основанный на согласовании управление/функции Ляпунова, который позволяет получить свойства цифровой системы близкие к непрерывной системе, в случае, если известно выражение для непрерывного закона управления в аналитической форме. Практическое использование этого метода ограничено нелинейными системами не выше второго порядка. Поэтому существует проблема, как реализовать закон управления, для нелинейных систем более высокого порядка, если при этом имеются лишь дискретные значения $u_c[kT]$ (T — период дискретизации).

В данной работе предлагается метод, позволяющий построить цифровой регулятор путем переоборудования непрерывного регулятора, для которого известны лишь дискретные значения закона управления, в том числе и в нелинейных системах, порядок которых $n > 2$.

2. Проектирование в дискретном виде

Непрерывный регулятор проектируется и затем реализуется в дискретном виде. Если речь идет о нелинейном объекте со статической обратной связью, наиболее распространенный подход состоит в прямой реализации непрерывного управления с помощью фиксатора нулевого порядка, который осуществляет дискретизацию непрерывного сигнала с фиксированным шагом, а также обеспечиват постоянный выходной сигнал в течение него. В этом случае мы говорим об эмуляции непрерывного регулятора. Эта процедура представляет собой обобщенную стратегию, однако, в качестве недостатков следует отметить, что из-за дискретизации теряется природа непрерывного регулятора [1]. В случае регулятора с обратной

связью по состоянию в некоторых работах говорится об условиях, при которых дискретный регулятор восстанавливает свойства непрерывного регулятора [2,3]. Дискретная модель непрерывного регулятора, которую получают путем использования дискретизации, обладает специфическими свойствами и описывается системой уравнений с учетом периода дискретизации. Метод проектирования в дискретном виде предлагает проектировать цифровые регуляторы, воспроизводящие свойства непрерывного регулятора с учетом дискретизации. Процедура синтеза цифрового закона управления ориентируется на использование непрерывного закона управления, в случае его существования, или описывается как разложение в ряд по степеням периода дискретизации для случая, когда не существует гладкого закона управления. Можно отметить, что на практике реализованы приближенные решения, содержащие лишь несколько конечных слагаемых закона управления.

3. Метод согласования управление/функция Ляпунова

Основной задачей системы управления нелинейным объектом с помощью этого метода является нахождение такого закона управления, при котором свойства дискретной системы были бы близки к свойствам непрерывной системы. При этом непрерывный объект управления описывается уравнением $\dot{x} = f_c(x) + g_c(x)u_c$. Можно предположить, что $u_c = u_k$ на каждом интервале времени длительностью *T*. В таком случае, уравнение может быть записано в виде разностного управления $x_{k+1} = e^{T(A_c x_c + u_c g_c)} x_k$.

Можно спроектировать такой цифровой регулятор, свойства которого будут согласованы в некоторые дискретные моменты времени со свойствами функции Ляпунова для непрерывной системы. Главной целью при этом является достижение хороших качественных показателей при работе дискретной системы при достаточно большом периоде дискретизации. В соответствии с [6], управление должно принимать вид:

$$u_k = u_{d0} + \sum_{i \geq 1}^{m} \frac{T^i}{(1+i)!} u_{di}, \qquad (1)$$

где

$u_{d0}[kT] = u_c(t)|_{t=kT} = u_c[kT]$,

$u_{d1}[kT] = \dot{u}_c(t)|_{t=kT} = \dot{u}_c[kT]$.

Здесь u_c — непрерывное управление, *m* — порядок приближения.

4. Метод с использованием разности дискретного управляющего воздействия

Даже в случае, если непрерывный закон управления имеет сложную форму, выражения, получаемые для производных, получаются достаточно объемными [4], в следствие чего возникают затруднения с вычислением этих выражений. Но в большинстве случаев, приходится сталкиваться с тем, что аналитическое выражение для непрерывного закона управления неизвестно. Существующие на данный момент методы, позволяют работать с системами, порядок которых *n*=1 *и n*=2. Для систем, порядок *n* которых больше, чем второй, эти методы неприменимы. В таких случаях, решение можно найти, на основе метода с использованием разности дискретного управляющего воздействия. Формулы, реализующие этот метод, представлены ниже:

$$\dot{u}_c[kT] \approx \frac{\Delta u_c}{T} = \frac{u_c[kT] - u_c[(k-1)T]}{T}.$$

При этом

$u_{d0} = u_c[iT]$ — непрерывный закон управления;

$\tilde{u}_{d1} = \Delta u_c[iT]$ — цифровое управление первого приближения;

Пример.

В качестве примера была рассмотрена система управления второго порядка для объекта, описываемого уравнением состояния $\dot{x} = \begin{bmatrix} -x1 + x2 \\ -(1+2x1)(x1-x2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_c$.

Для этой системы найден непрерывный закон управления $u_c = (1+2x_1)(x_1 - x_2) - x_1 - x_2$, а также найдена первая производная от непрерывного закона $\dot{u}_c = \frac{d}{dt} u_c = 2(x_1 + x_2 - x_2^2 - x_1^2 + 4x_1x_2)$.

Согласно (1), дискретное управление принимает вид:

$$u_k = (1+2x_1)(x_1 - x_2) - x_1 - x_2 + 0.05(x_1 + x_2 - x_2^2 - x_1^2 + 4x_1x_2).$$

Результаты симуляции в пакете Simulink представлены на изображениях ниже. Начальные условия: $x_1 = 1, x_2 = 0$.

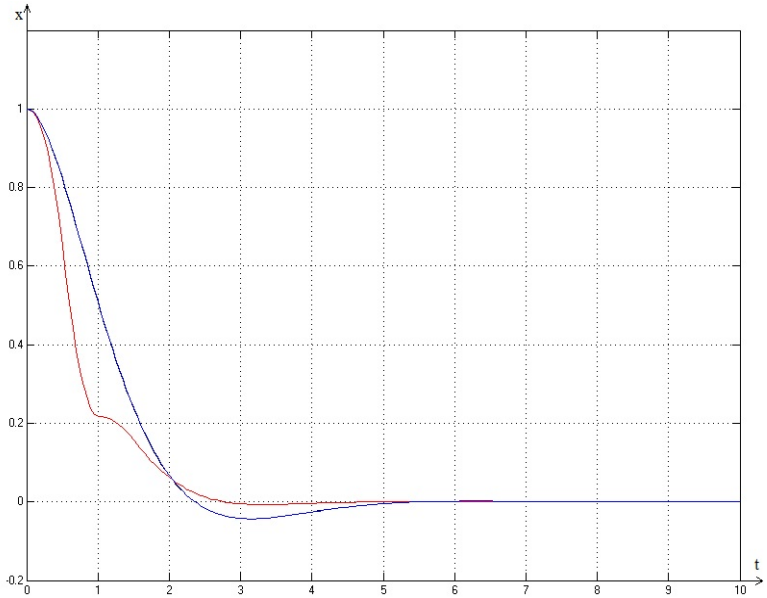


Рис. 1. Графики выхода ОУ в системе с различными регуляторами (непрерывный и дискретный с использованием производных)

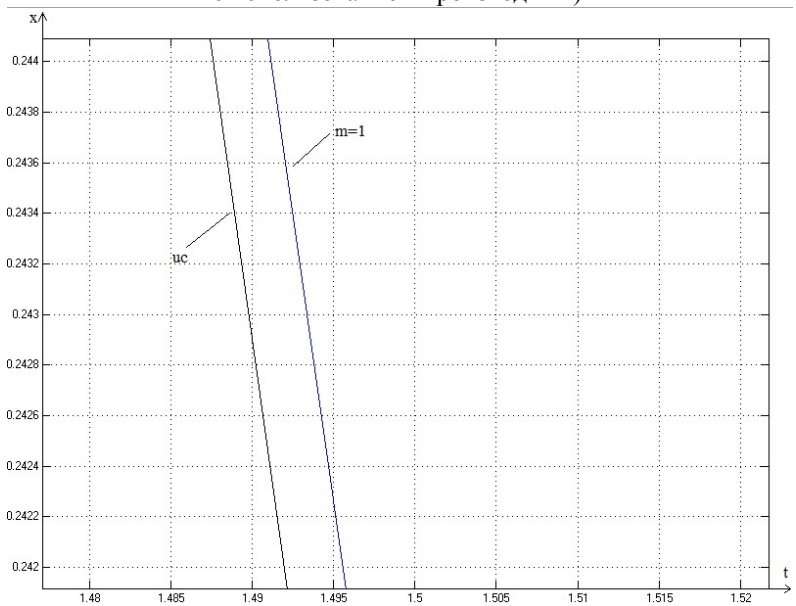


Рис. 2. Графики выхода ОУ в системе с различными регуляторами (непрерывный и дискретный с использованием производных) в увеличенном масштабе

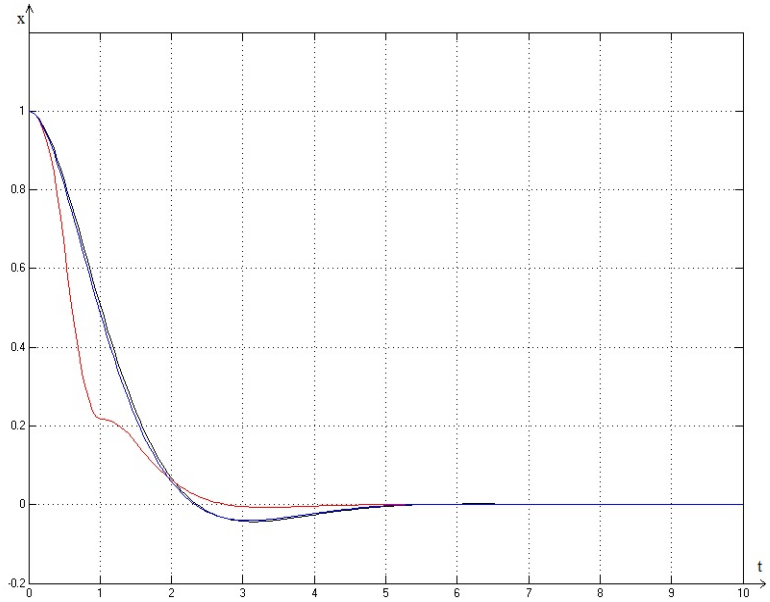


Рис. 3. Графики выхода ОУ в системах с различными регуляторами (непрерывный и дискретный с использованием разности)

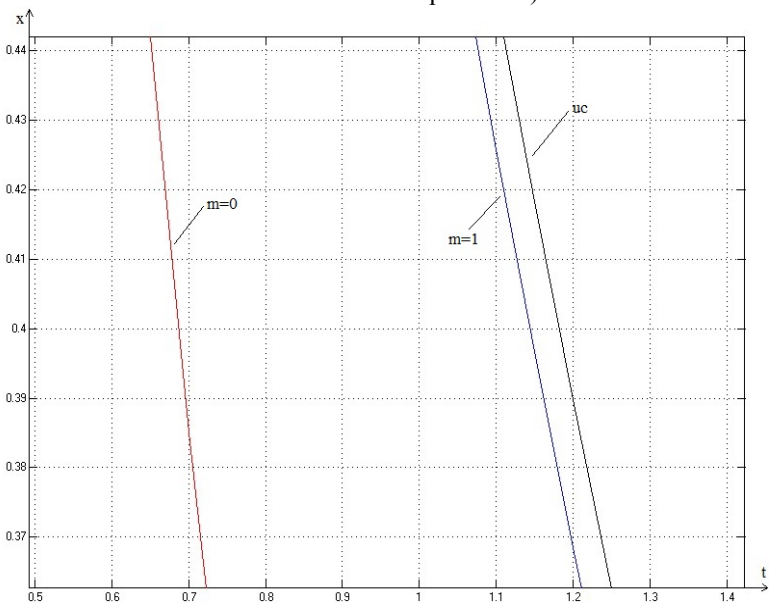


Рис. 4. Графики выхода ОУ в системах с различными регуляторами (непрерывный и дискретный с использованием разности) в увеличенном масштабе

Вывод

На основании сравнительной оценки свойств регуляторов, построенных по методу согласованного управления с использованием производных и разностного метода с помощью формулы $\int_0^t e^2(\tau)d\tau$, где e - разность выхода между непрерывным управлением и его дискретными приближениями, можно сделать вывод, что регуляторы, построенные с использованием разности, дают приближение к непрерывному закону управления. Если непрерывный закон управления неизвестен, то можно прибегать к использованию данного метода, который, несмотря на возникающую ошибку, дает приблизительное к непрерывной системе качество цифровой системы.

Таблица 1 - Результаты сравнительной оценки регуляторов

Порядок приближения	Метод с использованием производной	Метод с использованием разности
Нулевое приближение	0.06667	0.06667
Первое приближение	4.37*10^(-6)	5.4*10^(-4)

Библиографический список

1. S. Monaco and D. Normand-Cyrot. Approximation entrée sortie d'unsystème non linèaire continu par un système discret. Lect. Notes in Cont. and Info. Sciencesm(A.Bensoussan et J.L.Lions, Eds.), pages 354–364, 1986.
2. D. H. Owen, Y. Zheng and S. A. Billings. Fast sampling and stability of nonlinear sampled-data systems: Part *1*. existence theorems. IMA J. Math. Inform., vol. 7, pages 1–11, 1990.
3. Y. Zheng, D. H. Owen and S. A. Billings. Fast sampling and stability of nonlinear sampled-data systems: Part *1*. sampling rate estimation. IMA J. Math. Inform., vol. 7, pages 13–33, 1990.
4. Tanasa V. Development of theoretical and computational tools for the design of control strategies for nonlinear sampled-data systems. PhD Thesis. Universit´e Paris Sud Paris XI; Universit´e Politehnica de Bucarest, Paris, pages 92-93, 2012.
5. Tanasa V. Development of theoretical and computational tools for the design of control strategies for nonlinear sampled-data systems. PhD Thesis. Universit´e Paris Sud Paris XI; Universit´e Politehnica de Bucarest, Paris, page 197, 2012.
6. V. Tanasa, S. Monaco and D.Normand-Cyrot. Nonlinear optimal stabilizing control under sampling. 51st IEEE Conference on Decision and Control, 2012.
7. S. Monaco and D.Normand-Cyrot. Advanced Tools for Nonlinear Sampled-Data Systems' Analysis and Control. Article in European Journal of Control, 2007.

УДК 519.711; ГРНТИ 50.43.17

ЦИФРОВОЙ ЗСУР-РЕГУЛЯТОР ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ В ВИДЕ СФЕРИЧЕСКОГО РЕЗЕРВУАРА

А.И. Бобиков, О.Н. Буркина

Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, olka-burkina@yandex.ru

Аннотация. В данной работе с помощью метода согласования управления/функция Ляпунова получен цифровой ЗСУР закон управления, при котором цифровая система управления сферическим резервуаром близка по своим свойствам к свойствам субоптимальной непрерывной системы.

Ключевые слова: зависящее от состояния уравнение Риккати (ЗСУР), нелинейный объект, период дискретизации, сферический резервуар, методика согласования управления/функция Ляпунова.

DIGITAL ZSUR-REGULATOR FOR NONLINEAR CONTROL OBJECT IN THE FORM OF SPHERICAL TANK

A.I. Bobikov, O.N. Burkina

Ryazan State Radioengineering University,
Russia, Ryazan, olka-burkina@yandex.ru

Abstract. This paper deals with the mathematical model of the control object, then designed ZSUR-controller, and regulation problem is solved. Using the method of harmonizing control/ Lyapunov function obtained ZSUR discrete control law for spherical tank.

Keywords: ZSUR, nonlinear object, sampling period, spherical tank, matching the control method / Lyapunov function.

За последние десятилетия в качестве общих методов проектирования появилась стратегия зависящего от состояния уравнения Риккати (ЗСУР), которая предоставляет систематические и эффективные средства проектирования непрерывных нелинейных систем, и имеет много возможностей, которыми не обладают другие нелинейные методы проектирования [3]. Из-за больших достоинств в настоящее время актуальной задачей является синтез нелинейного цифрового управления.

Для дискретизации непрерывных систем применение находит эмуляция Эйлера [5], которая дает положительные результаты лишь при малых периодах дискретизации T. Однако в этом случае с увеличением T исчезают многие свойства непрерывного ЗСУР-регулятора. В [3] рассмотрено решение этой проблемы, связанное с использованием методики согласования управления/функции Ляпунова, так как она восстанавливает утерянные свойства непрерывного регулятора, позволяет увеличить период дискретизации T, и в результате дискретная реализация становится более близкой к непрерывной реализации.

Идея метода согласования управления/функции Ляпунова заключается в следующем.

Пусть непрерывный нелинейный объект управления описывается уравнением

$$\dot{x} = f_c(x) + g_c(x)u_c. \tag{1}$$

В результате расширенной параметризации [4] получаем $f_{\tilde{n}}(x) = A_{\tilde{n}}(x)x_c$. Предположим, что $u_c(t) = u_k = const,\ k = 0,1,2,...t \in [kT,(k+1)T]$ на каждом временном интервале с периодом дискретизации *T*, тогда дискретную эквивалентную модель системы, описанную (1), можно представить в виде нелинейного разностного уравнения

$$x_{k+1} = e^{T(A_c x_c + u_c g_c)} x_k, \tag{2}$$

где $e^{T(A_c x_c + u_c g)} = 1 + \sum_{i \geq 1} \frac{T^i L^i (A_c x_c + u_k g_c)}{i!}$ представляет собой экспоненциальный оператор Ли *L*, связанный с правой частью уравнения (1) в моменты дискретизации $x(t = kT) = x_k$ для $k \geq 1$ при $x_0 = \tilde{o}(t = 0)$.

Уравнение (3) описывает разность функции Ляпунова.

$$V(x_c)|_{t=(k+1)T} - V(x_c)|_{t=kT} = \int_{kT}^{(k+1)T} \dot{V}(x_c(\tau))d\tau, \tag{3}$$

Левая часть (3) представляет эволюцию дискретной системы и может быть вычислена как

$$V(e^{T(A_c x_c + u_k g_c)} x|_{x_k}) - V(x_k). \tag{3а}$$

Для получения цифрового управления с обратной связью необходимо решить уравнение (3) до *m* приближений в *T*. Оно принимает следующий вид [2]:

$$u_k = u_d^T = u_{d0} + \sum_{i \geq 1}^{m} \frac{T^i}{(1+i)!} u_{di}, \tag{4}$$

где

$$u_{d0} = u_c|_{t=kT}, \tag{4а}$$

$$u_{d1} = \dot{u}_c|_{t=kT}, \tag{4б}$$

$$u_{d2} = \ddot{u}_c|_{t=k\grave{O}} + \frac{u_{d1}}{2} \cdot \frac{L_f L_g V - L_g L_f V}{L_g V}|_{t=k\grave{O}}. \tag{4в}$$

Здесь $u_c(t)$ – непрерывное управление, $L_f L_g V = \frac{\partial L_g V}{\partial x} \cdot f = \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\partial V}{\partial x} \cdot g\right] f$, $L_g L_f V = \frac{\partial L_f V}{\partial x} \cdot g = \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\partial V}{\partial x} \cdot f\right] g$.

Удается осуществить применение данной концепции для решения проблем, связанных с построением цифрового закона управления, путем реализации методов обратного шага (backstepping) и пассивного контроллера [5].

Рассмотрим применение этой методики для реализации цифрового управления сферическим резервуаром с жидкостью, который представлен на рисунке 1.

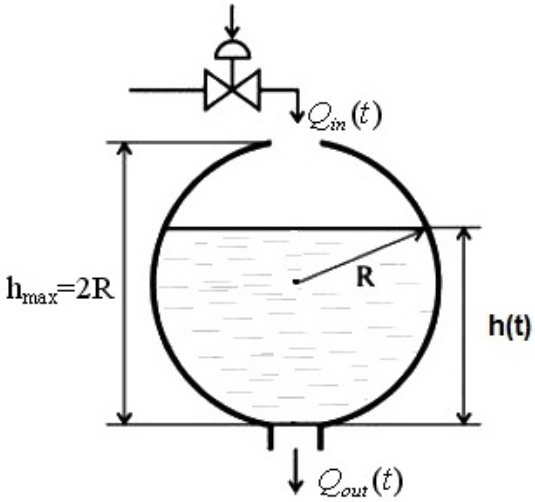


Рис. 1. Схематическая модель сферического резервуара

Здесь R – радиус сферического резервуара, $h(t)$ – уровень жидкости. Слив жидкости $Q_{out}(t)$ идет через нижнюю трубу под действием силы тяжести, $Q_{in}(t)$ и $Q_{out}(t)$ – расходы жидкости (скорость поступления и оттока жидкости размерностью л/с или м^3/с). Рассматривается задача стабилизация уровня жидкости при заданном номинальном значении $h_0 = const$. Управление уровнем жидкости в закрытом сферическом резервуаре осуществляется регулятором через поступающий поток жидкости. За расход жидкости отвечает регулируемый клапан. Возмущающим воздействием в данном случае является расход выхода.

Нелинейная динамика объекта управления главным образом обусловлена сферической формой резервуара и особенностями клапана.

Обозначим $h(t)$ как $x(t)$, и, следовательно, $\dfrac{dh(t)}{dt} = \dot{x}$. Нелинейная модель процесса управления уровнем жидкости в резервуаре, другими словами, уравнение объекта управления имеет вид [1]:

$$\tilde{o} = \frac{-\tilde{n}_p \sqrt{2g\tilde{o}(t)}}{\pi(2R\tilde{o}(t) - \tilde{o}^2(t))} + \frac{u(t)}{\pi(2R\tilde{o}(t) - \tilde{o}^2(t))}, \tag{5}$$

где $f(x) = \dfrac{-c_p\sqrt{2gx(t)}}{\pi(2Rx(t) - x^2(t))}$, $g(x) = \dfrac{1}{\pi(2Rx(t) - x^2(t))}$ - скалярные функции.

В уравнении (5) для состояния равновесия x и u не равны нулю, т.е. $f(0)\neq 0$. Таким образом, требуется зависящая от состояния параметризация, при которой выполняется условие $f(0)=0$. Чтобы применить метод ЗСУР, уравнение (5) должно быть преобразовано так, чтобы переменная состояния, также как управление, была равна нулю в состоянии равновесия. Обозначая в состоянии равновесия, т.е. при $\dot{x} = 0$, переменную состояния как $\bar{x}$, из уравнения (5) определяем уравнение $\bar{u} = c_p\sqrt{2g\bar{x}}$, чтобы удерживать уровень жидкости в состоянии равновесия. С помощью введения отклонений переменной состояния X и управления U относительно их значений $\bar{x}$ и $\bar{u}$ в состоянии равновесия

$$X = x - \bar{x}, U = u - \bar{u}. \tag{6}$$

Представим уравнение (1) в отклонениях

$$\dot{X} = f(X) + g(x)U, \tag{7}$$

где

$$f(X)=\frac{-\tilde{n}_p\sqrt{2g(\bar{x}+X)}-\sqrt{2g\bar{x}}}{\pi(2R(\bar{x}+X)-(\bar{x}+X)^2)}, \tag{8}$$

$$g(x)=\frac{1}{\pi(2R(\bar{x}+X)-(\bar{x}+X)^2)}. \tag{9}$$

При этом для реальной модели управления параметры принимают значения $c_p=0.05$, $g=10м/c^2$, $R=1м$, $\bar{x}=1$, $\bar{u}=0.2236$.

Непрерывное ЗСУР управление для сферического резервуара имеет вид [1]:

$$u_c(c)=U(X(t))=\tilde{n}_p(\sqrt{2g(\bar{x}+X)}-\sqrt{2g\bar{x}})-sign(X)\sqrt{\tilde{n}_p{}^2(\sqrt{2g(\bar{x}+X)}-\sqrt{2g\bar{x}})^2+X^2}. \tag{10}$$

Рассмотрим предлагаемую методику синтеза цифрового регулятора. Для этого положим $q=\sqrt{\tilde{n}_p{}^2(\sqrt{2g(\bar{x}+X)}-\sqrt{2g\bar{x}})^2+X^2}$, $z=gc_p{}^2(\sqrt{\bar{x}+X}-\sqrt{\bar{x}})$.

Используя формулы (4а) и (4б), получаем выражения:

$$u_{d0}=u_c\,|_{t=kT}=\tilde{n}_p(\sqrt{2g(\bar{x}+X)}-\sqrt{2g\bar{x}})-sign(X)q, \tag{11}$$

$$u_{d1}=\dot{u}_c\,|_{t=kT}=\frac{\tilde{n}_p\dot{X}\sqrt{2g}}{2\sqrt{\bar{x}+X}}-\frac{sign(X)\dot{X}}{q}\left(\frac{z}{\sqrt{\bar{x}+X}}+X\right). \tag{12}$$

Для приближения m=1 с учетом полученных выражений (11),(12) цифровое управление сферическим резервуаром при периоде дискретизации T в соответствии с формулой (4) принимает вид:

$$\begin{aligned}u_k&=u_d^T=\tilde{n}_p(\sqrt{2g(\bar{x}+X)}-\sqrt{2g\bar{x}})-sign(X)q+\\&+\frac{T}{4q\sqrt{\bar{x}+X}}\left[q\tilde{n}_p\dot{X}\sqrt{2g}-2sign(X)\dot{X}(z+X\sqrt{\bar{x}+X})\right]\end{aligned} \tag{13}$$

На рисунках 2 и 3 представлены графики зависимости $x(t)$ при различных периодах дискретизации T, полученные при эмуляционном моделировании цифрового закона управления (13) сферическим резервуаром при начальных условиях $\bar{x}=1$, $\bar{u}=0.2236$.

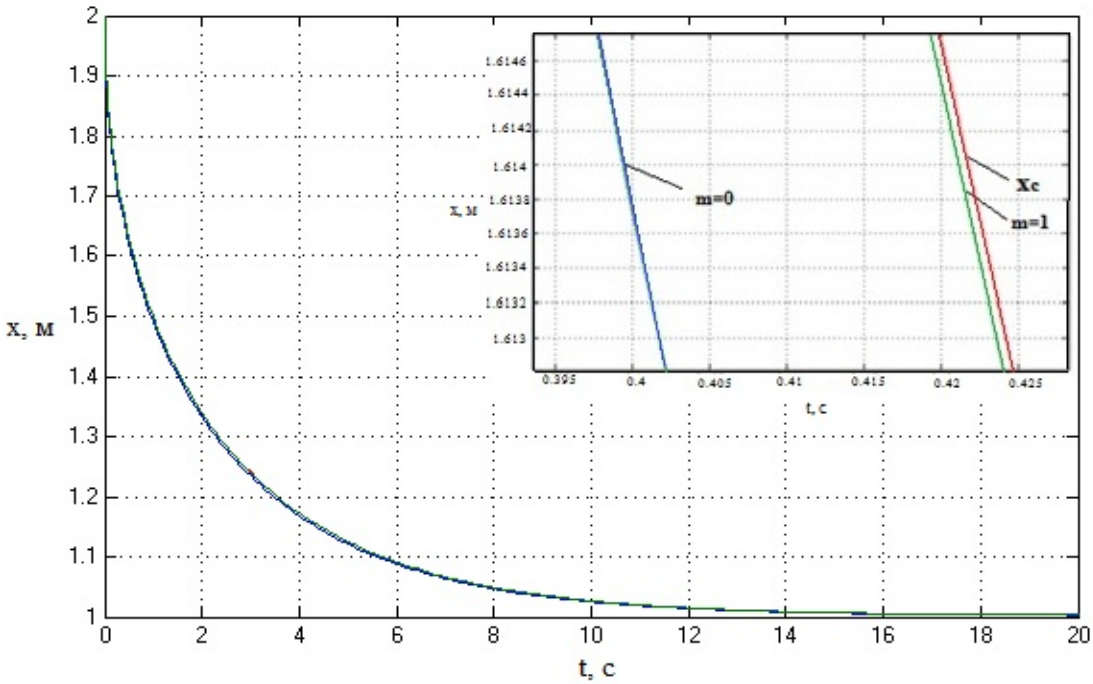


Рис. 2. Зависимость $x(t)$ при периоде дискретизации T=0.1с

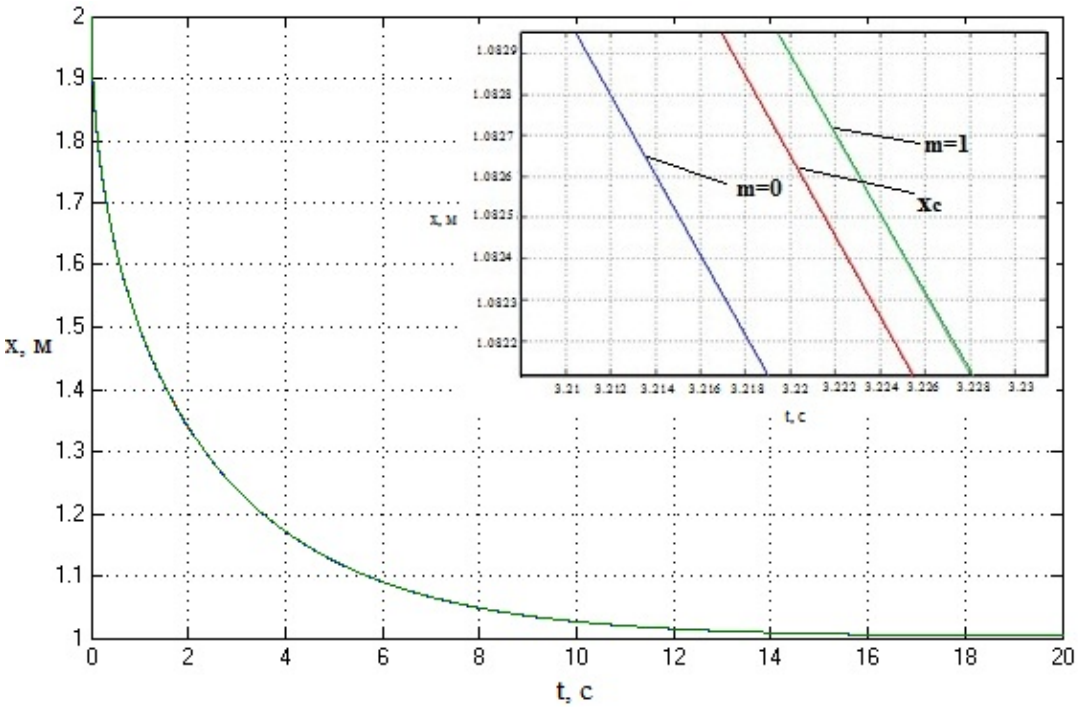


Рис. 3. Зависимость $x(t)$ при периоде дискретизации T=0.01с

Анализируя результаты, представленные на рисунках 2 и 3, можно сделать вывод о том, что для системы сферического резервуара с помощью методики согласования управления/функция Ляпунова можно построить цифровую систему, практически эквивалентную непрерывной x_c в каждый момент времени. Необходимо отметить, что при одной и той же точности применяемый метод дает возможность увеличивать период дискретизации T.

Дополнительно для анализа качества используемого метода воспользуемся таким критерием качества, как интегральная квадратическая ошибка вида

$$J = \int_0^\infty \varepsilon^2(t)dt. \tag{14}$$

Таблица 1 - Вычисление интегральной квадратичной ошибки

Порядок приближения m	Период дискретизации	
	T=0.01 с	T=0.1 с
m=0	J=0.0003279	J=0.0003264
m=1	J=0.0002224	J=0.0000072

В таблице 1 представлены результаты, свидетельствующие о том, что при увеличении порядка приближения до m=1 цифровая реализация системы сферического резервуара становится более близкой к непрерывной реализации, чем при m=0. Это подтверждает правильность выводов, сделанных при анализе рисунков 2 и 3.

Библиографический список

1. Бобиков А.И. Субоптимальные нелинейные системы управления. Метод расширенной линеаризации. Рязань, 2015.
2. Бобиков А.И., Галкина Е.А. Цифровой ЗСУР-регулятор для нелинейного объекта управления: Материалы Международной научно-практической конференции. Сочи, 2016.
3. Monaco S, Normand-Cyrot D. Issues on nonlinear digital systems. Eur J Control 2001.
4. Mracek C. P., Cloutier J. R. Control designs for the nonlinear benchmark problem via the state-dependent Riccati equation method, International Journal of Robust and Nonlinear Control, 1998.
5. Tanasa V. Development of theoretical and computational tools for the design of control strategies for nonlinear sampled-data systems. PhD Thesis. Universit´e Paris Sud Paris XI; Universit´e Politehnica de Bucarest, Paris.

УДК 681.515; ГРНТИ 28.15.15

ПРЕДИКТОР СМИТА С ФИЛЬТРОМ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

А.И. Бобиков, Т.С. Бубнова
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, tanya.bubnova.94@mail.ru

Аннотация. Рассматривается использование предиктора Смита с фильтром для управления объектом с запаздыванием, с целью обеспечить робастность системы по отношению к внешним воздействиям и неточностям модели.

Ключевые слова: фильтрующий предиктор Смита, ПИД-регулятор, транспортное запаздывание.

FILTERED SMITH PREDICTOR FOR CONTROL SYSTEM WITH TIME DELAY OBJECT

A.I. Bobikov, T.S. Bubnova
Ryazan State Radio Engineering University
Russia, Ryazan, , tanya.bubnova.94@mail

Abstract. We consider the use of a filter Smith predictor for controlling an object with a delay, in order to ensure the robustness of the system in relation to external influences and inaccurate model.

Keywords: filtered Smith predictor, PID controller, transport delay.

Введение

Во многих процессах встречается запаздывание, связанное с выполнением какого-либо процесса в системе управления. Традиционные регуляторы трудно использовать в подобных процессах из-за наличия эффекта отрицательной фазы. Эта проблема преодолевается с помощью компенсации временной задержки, помогающей улучшить производительность системы с замкнутым контуром. На сегодняшний день разработано достаточно методов управления системой с запаздыванием. Например, в работе [2] было предложено осуществить синтез непрерывных иммунного и ПИД-регуляторов, где коэффициенты ПИД-регулятора самонастраивающиеся за счет применения нечеткой логики. При этом описано использование модифицированного предиктора Смита, который позволяет не учитывать влияние запаздывания при расчете управляющего устройства. Подобная структура достаточно точно отрабатывает постоянное задающее воздействие, однако чувствительна к возмущающим воздействиям, которые неизбежны в реальных системах управления.

С целью повышения робастности по отношению к внешним воздействиям и неточностям модели в работах [3, 4] предложено использовать предиктор Смита с фильтром. В данной статье с целью уменьшения влияния постоянного возмущающего воздействия предложено заменить рассмотренный в [2] предиктор Смита на предиктор Смита с фильтром. При этом для настройки иммунного регулятора и фильтра применяется пакет Simulink Design Optimization в системе Matlab, позволяющий находить оптимальные параметры регулятора в соответствии с заданными заранее желаемыми характеристиками управления, а именно перерегулированием, временем нарастания, временем установления. Кстати, ПИД-регулятор остается самонастраивающимся за счет применения нечеткой логики.

В качестве объекта управления рассматривается система, состоящая из трех баков с жидкостью, последовательно соединенных каскадно неинерционной связью. Передаточная функция объекта управления описывается выражением:

$$W(p) = \frac{2e^{-p}}{(3p+1)(3p+1)(3p+1)}.$$

1. Система с непрерывным самонастраивающимся ПИД-регулятором и предиктором Смита с фильтром

Система с непрерывным самонастраивающимся ПИД-регулятором и предиктором Смита с фильтром (рис. 1) объединяет в себе достоинства, включенных в него регуляторов, а так же позволяет повысить робастность за счет применения фильтра.

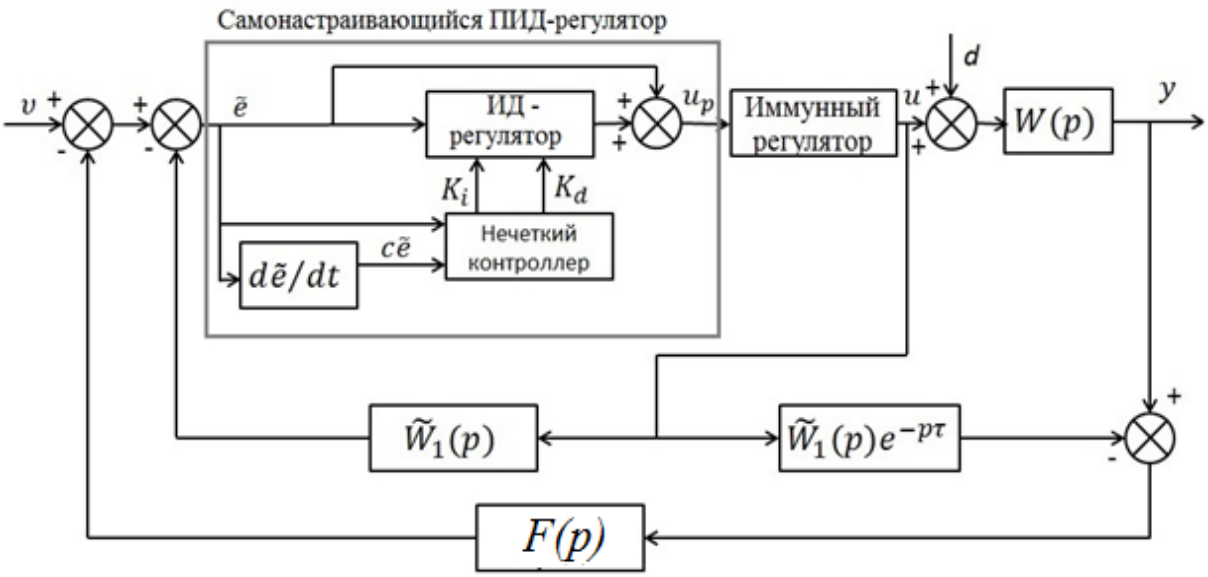


Рис. 1. Структурная схема системы с непрерывным самонастраивающимся ПИД-регулятором и предиктором Смита с фильтром

На рисунке 1 $\widetilde{W}_1$ – передаточная функция (ПФ) свободной от запаздывания части модели ОУ, $W(p)$ – ПФ реального объекта, τ – время запаздывания, d –возмущающее воздействие, *F(p)* – фильтр, v является входным сигналом, y - выходным сигналом.

Для настройки рассматриваемой системы управления необходимо осуществить два шага. Первый шаг заключается в настройке непрерывного иммунного регулятора, при этом параметры фильтра возьмем согласно рекомендованным в [3,4].

2. Настройка непрерывного иммунного ПИД-регулятора

Работа иммунного регулятора основана на процессах, протекающих в живых организмах. Искусственная иммунная система представляет собой интеллектуальную систему, разработанную на основе принципов и механизмов биологической иммунной системы, что способствует повышению надежности и способности адаптироваться в условиях с большим количеством возмущающих воздействий и неопределенностей.

Закон управления подобного регулятора имеет вид:

$$k_{p_1}(du/dt) = K[1-\eta f(du/dt)], \quad \text{где} \quad f\left(\frac{du}{dt}\right) = 1 - \frac{2}{1+\exp\left(-\frac{\tau du}{dt}\right)}.$$

Здесь K – коэффициент усиления нелинейного иммунного регулятора; η – постоянная, определяющая устойчивость процессов иммунного регулирования. Параметры K и η выбираем так, чтобы эффект управления был оптимален. С этой целью добавлен блок оптимизации Check Step Response Characteristics пакета Matlab/Simulink. Блок оптимизации позволяет заранее задать основные показатели качества переходного процесса при постоянном ступенчатом воздействии (рис. 2), после чего осуществляется автоматический подбор коэффициентов K и η.

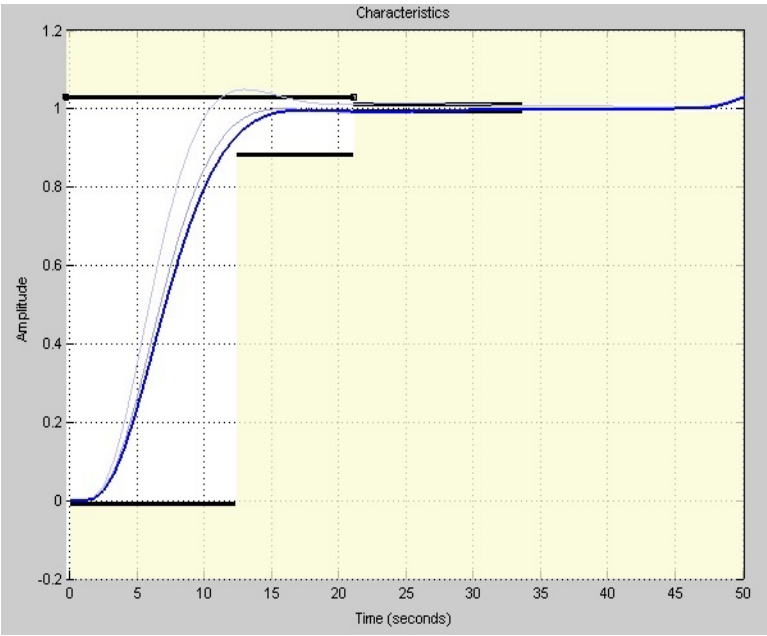


Рис. 2. Оптимизация управления в блоке Check Step Response Characteristics

При проектировании комбинации иммунного и ПИД-регуляторов воспользуемся законом управления следующего вида

$$u(t) = k_{p_1}\left(\frac{du}{dt}\right)e(t) + K_i\int e(\tau)d\tau + \frac{K_d de}{dt},$$

где K_i, K_p и K_d – коэффициенты интегрирующего, пропорционального и дифференцирующего звена ПИД-регулятора соответственно.

В [2] было показано, что эффективность управления можно повысить за счет использования самонастраивающегося ПИД-регулятора, работающего на базе нечеткой логики. Нечеткий самонастраивающийся ПИД-регулятор является комбинацией нечеткого контроллера (НК) и классического ПИД-регулятора. В основе регулятора лежит использование нечетких правил, которые формулируются на основе свойств объекта управления.

3. Настройка фильтра

Второй шаг заключается в настройке фильтра таким образом, чтобы система была робастной по отношению к возмущающим воздействиям. Предиктор Смита с фильтром помогает избавиться от воздействий шумов на систему управления и гарантирует внутреннюю устойчивость системы управления.

Фильтр является системой первого порядка с одним параметром (постоянной времени T_f) и имеет вид $F(s) = \frac{1}{1+T_f s}$, где $T_f = \varepsilon d_n$, $\varepsilon > 0$. Как правило, [3,4] принимают $\varepsilon = 0{,}5$, но с целью получения оптимального эффекта управления использован блок Check Custom Bounds пакета Matlab/Simulink, позволяющий подобрать ε таким образом, чтобы влияние возмущающих воздействий и неточностей модели оказывали минимальное воздействие на эффект управления. При этом одновременная настройка иммунного регулятора и фильтра невозможны, так как блок оптимизации Check Step Response Characteristics помогает подобрать коэффициенты согласно заранее заданным характеристикам управления в момент нарастания и установления сигнала, а блок Check Custom Bounds позволяет настроить влияние возмущения. Таким образом настройка параметров регуляторов и фильтра помогают обеспечить оптимальное робастное управление.

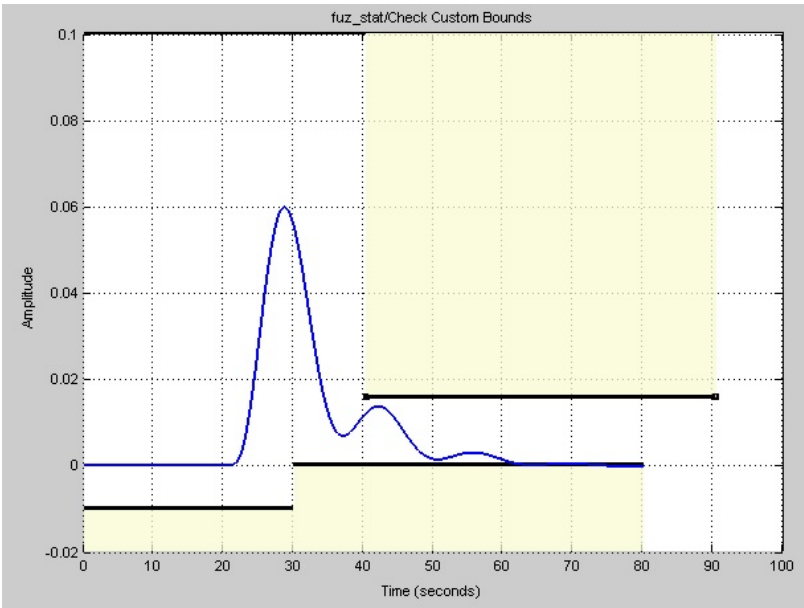


Рис. 3. Оптимизация управления в блоке Check Custom Bounds

4. Экспериментальные исследования

На основе описанного метода были найдены параметры непрерывного иммунного ПИД-регулятора: $\eta = 0.0034, K = 0.8571$. После чего был подобран коэффициент $\varepsilon = 0{,}2$ для фильтра.

На рисунке 4 представлена реакция системы при единичном ступенчатом сигнале, равным единице, на входе и возмущающим воздействии d(t)=0.1*(t-40) приложенном к входу объекта в момент времени t=40.

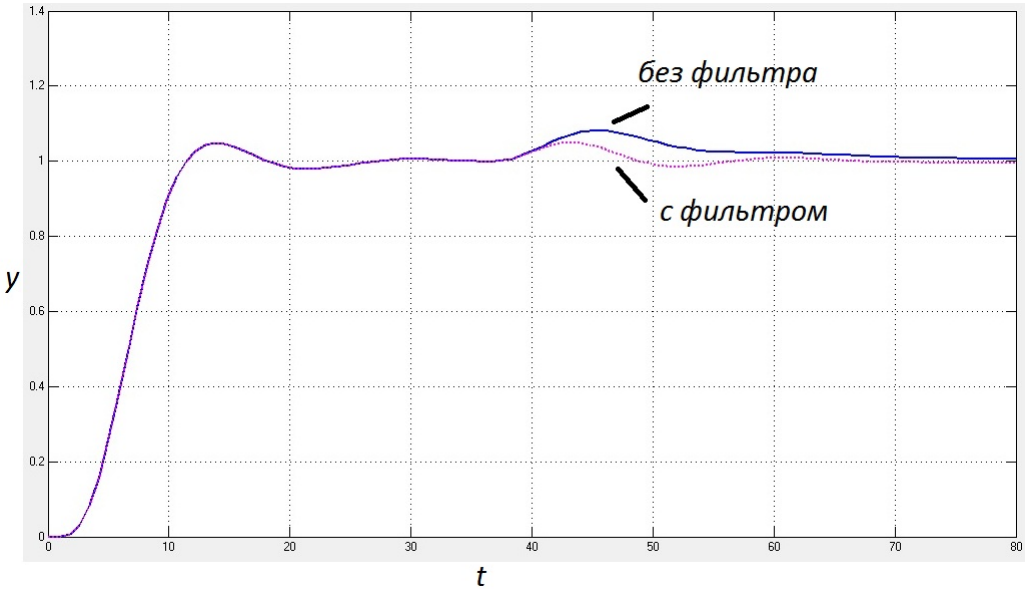


Рис. 4. Реакция системы при единичном ступенчатом сигнале, равным единице, на входе и возмущающим воздействии d(t)=0.1*(t-40) приложенном к входу объекта в момент времени t=40

Как видно из рисунках 4, 5 использование предиктора Смита с фильтром помогает повысить снизить влияние возмущающих воздействий. Высота реакции на возмущающее воздействие системы без фильтра 0,087, а системы с предиктором Смита с фильтром 0,045. Так же при неточных параметрах модели система без фильтра оказывается неустойчивой, включение предиктора Смита с фильтром помогает избежать этой проблемы.

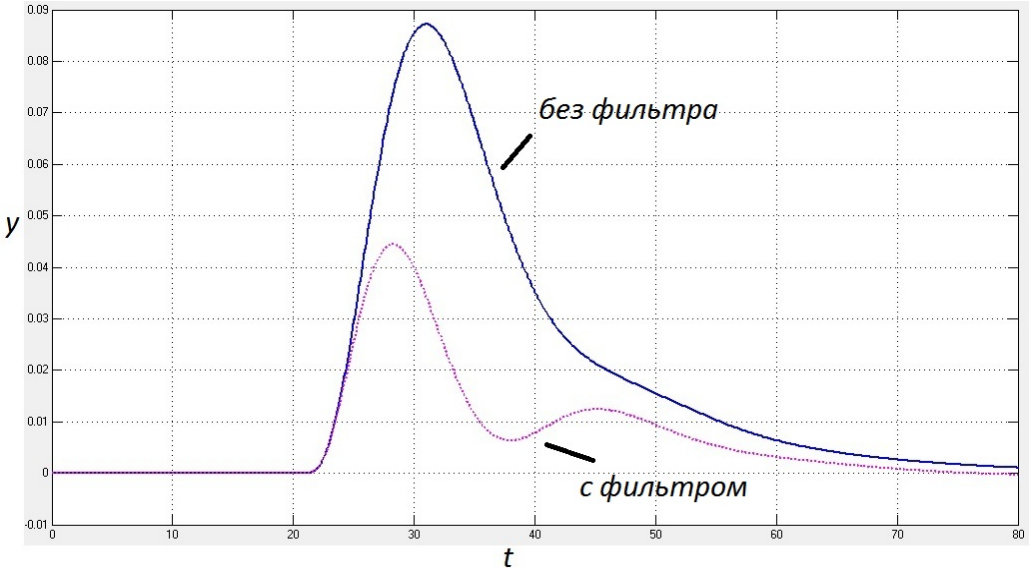


Рис. 5. Реакция системы при единичном ступенчатом сигнале, равным нулю, на входе и возмущающим воздействии d(t)=0.1*(t-20) приложенном к входу объекта в момент времени t=20

Выводы

В данной статье рассмотрена система управления объектом с запаздыванием с помощью комбинации непрерывных иммунного регулятора, настроенного с помощью пакета оптимизации Matlab/Simulink и самонастраивающегося ПИД-регулятора, а так же предиктором Смита с фильтром.

В данной статье за счет добавления фильтра в систему управления была повышена робастность по отношению к возмущающим воздействиям, а использование пакета оптимизации Simulink Design Optimization в системе Matlab помогло оптимально подобрать коэффициенты иммунного регулятора и фильтра.

Библиографический список

1. Бобиков А.И., Бубнова Т.С. Непрерывный иммунный ПИД-регулятор, Материалы докладов XXVIII всероссийской научной конференции БИОМЕДСИСТЕМЫ – 2015, Рязань, 2015.
2. Бобиков А.И., Бубнова Т.С., Попова А.А. Непрерывный иммунный самонастраивающийся ПИД-регулятор для объекта с запаздыванием. — Рязань. Вестник РГРТУ №59, 2017.
3. J. E. Normey-Rico and E. F. Camacho, “Unified approach for robust dead-time compensator design,” Journal of Process Control,, 2009. - №1. - С. 38-47.
4. Z. Palmor, “Time-delay compensationsmith predictor and its modifications,” The control handbook, vol. 1, pp. 224–229, 1996.

УДК 681.51; ГРНТИ 50.43.15

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ОБЩЕГО ВОЗДУХА БАРАБАННОГО КОТЛА

З. Пикуль
Амурский государственный университет,
Амурская область, Благовещенск, zcx1@protonmail.com

Аннотация. В данной работе рассмотрены особенности системы общего воздуха, как объекта управления. Проводится синтез адаптивного регулятора с фильтр-корректором для структурно и параметрически неопределенного объекта.

Ключевые слова: относительный порядок, передаточная функция, изменение структуры, запаздывание, адаптивный регулятор, фильтр-корректор

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM TOTAL AIR DRUM BOILERS

Z. Pikul
Amur State University,
Amur region,Blagoveshensk,zcx1@protonmail.com

Abstract. In this paper, the features of the total air system as the control object. Held synthesis of adaptive control with filter corrector for structural and parameter indenermination of the object.
Keywords: The relative order of the transfer function, changing the structure of the delay, adaptive control, filter corrector

1. Введение

У некоторых объектов управления (ОУ) нормальный режим работы подразумевает как параметрическую, так и структурную неопределенность, разработка систем управления для таких объектов может быть дополнительно осложнена наличием запаздывания. [1–8] Данные качества объекта приводят к изменению математической модели, что затрудняет получение математического описания объекта управления. [2],[3],[9],[10]

Одной из таких систем является система автоматического регулирования (САР) расхода общего воздуха (РОВ). Данная система предназначена для поддержания наиболее экономичного режима сжигания топлива в топке котла, таким образом, она имеет прямое отношение к КПД котла. [2],[11]

САР РОВ изображена на рисунке 1, где: $P_{зад}$ – задание на давление воздуха в магистрали, P – давление воздуха в магистрали барабанного котла (БК), САР – система автоматического регулирования, НА ДВ – направляющие аппараты дутьевых вентиляторов, ОУ – объект управления.

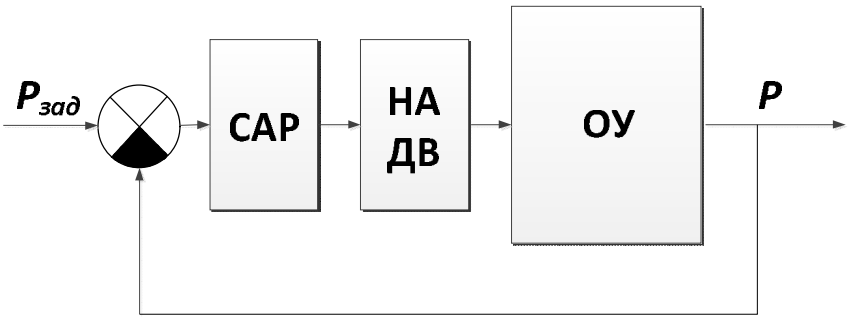


Рис. 1. Схема регулирования РОВ

Существует несколько схем автоматического управления РОВ: регулирование экономичности по соотношению топливо-воздух, регулирование экономичности по соотношению сигналов теплота-воздух, регулирование экономичности по соотношению задание-воздух. [1],[2]

Стоит отметить, что ОУ изображенный на рисунке 1, представляет собой достаточно протяженную и разветвленную магистраль, кроме того, на выходе объекта могут присутствовать один или несколько потребителей, например, молотковая мельница (ММТ), горелка. В работе [12] были обработаны экспериментальные характеристики САР РОВ и получено математическое описание, из которого видно, что система обладает значительным запаздыванием и может быть описана дифференциальными уравнениями с изменяющимися параметрами и структурой.

В настоящей работе, опираясь на результаты [10],[12–18], проводится построение регулятора для ОУ с запаздыванием, с использованием фильтр-корректора (ФК) и явно-неявного эталона, имитационное моделирование системы управления.

2. Система регулирования

Из работы [12] можно выделить математическое описание объекта для различных режимов (1)-(3).

$$W_{îó1}(p) = \frac{\beta_1 p + \beta_2}{\alpha_1 p^3 + \alpha_2 p^2 + \alpha_3 p + \alpha_4} e^{-p\tau} \quad , \tag{1}$$

где $0.0004329 \le \beta_1 \le 0.0006494$, $0.000001728 \le \beta_2 \le 0.000002592$, $0.8 \le \alpha_1 \le 1.2$, $0.02369 \le \alpha_2 \le 0.03554$, $0.0004053 \le \alpha_3 \le 0.000608$, $0.0000026 \le \alpha_4 \le 0.0000040$, $\tau = 60c$.

$$W_{îó3}(p) = \frac{\beta_5}{\alpha_9 p^2 + \alpha_{10} p + \alpha_{11}} e^{-p\tau} \quad , \tag{2}$$

где $0.001464 \le \beta_5 \le 0.002196$, $0.8 \le \alpha_9 \le 1.2$, $0.02668 \le \alpha_{10} \le 0.04002$, $0.0025992 \le \alpha_{11} \le 0.003898$, $\tau = 60c$.

Параметры объекта в режимах (1) – (2) могут изменяться скачкообразно и сложно прогнозируемы.В системе управления, независимо от начальных условий, в условиях априорной неопределенности о значении параметров и наличии помех, требуется обеспечить достижение:

1) цели управления

$$\lim_{t\to\infty} \left| y(t) - y_{Moo}(t) \right| \le \sigma_y, \sigma_y = const > 0 \tag{3}$$

2) целей адаптации

$$\begin{gathered} \lim_{t\to\infty} \left| C_1(t) - C_{01} \right| \le \sigma_{x1}, \sigma_{x1} = const > 0 \\ \lim_{t\to\infty} \left| C_2(t) - C_{02} \right| \le \sigma_{x2}, \sigma_{x2} = const > 0 \\ \lim_{t\to\infty} \left| C_3(t) - C_{03} \right| \le \sigma_{x3}, \sigma_{x3} = const > 0 \\ \lim_{t\to\infty} \left| k(t) - k_0 \right| \le \sigma_k, \sigma_k = const > 0 \end{gathered} \tag{4}$$

Требуется синтезировать систему управления для ОУ (1) – (2).

Подробный синтез алгоритмов управления показан в работах [10],[13],[14],[16],[17]. В данной работе мы определим явный вид эталонной модели (ЭМ), зададим структуру адаптивного регулятора, определим цели управления и цели адаптации, определим явный вид фильтр-корректора (ФК), синтезируем алгоритмы адаптации.

Определим явный вид ЭМ для ОУ (1)–(2):

$$W_{ýì}(p) = \frac{1}{\alpha_{M1} p^3 + \alpha_{M2} p^2 + \alpha_{M3} p + 1} \tag{5}$$

Структуру адаптивного регулятора зададим следующим образом:

$$u(t) = k(t)u(t-\tau) - (C_1(t)x_1(t) + C_2(t)x_2(t) + C_3(t)x_3(t)) \quad , \tag{6}$$

где $k(t), C_1(t), C_2(t), C_3(t)$ –коэффициенты самонастройки регулятора, алгоритмы которых будут определены позднее, $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$ – переменные состояния объекта.

Очевидно, что переменные состояния ОУ не доступны для измерения, поэтому регулятор вида (4) технически не реализуем. Аналогично [16] вводим в рассмотрение фильтр-корректор (ФК).

$$W_{ÔÊ}(p) = \frac{(Tp+1)^{n-m-1}}{(T_0 p+1)^{n-1}}, \tag{7}$$

где $T_0 << T$ –постоянные времени, m – порядок числителя ОУ, n – порядок знаменателя ОУ.

Отметим, что в отличии от [16] ФК имеет порядок *n-m-1*, что значительно упрощает техническую реализацию системы за счет подбора меньших T_0 и T по сравнению с [16].

В нашем случае явный вид ФК будет следующим:

$$W_{\hat{o}\hat{e}}(p) = \frac{\beta_{\hat{O}1} p + 1}{\alpha_{\hat{O}1} p^2 + \alpha_{\hat{O}2} p + 1} \tag{8}$$

Можно показать, что если адаптивные алгоритмы заданы в виде:

$$\begin{aligned}
\frac{dk(t)}{dt} &= \begin{cases} h_k \nu(t) r(t), & \forall |\nu(t)| > \Delta, \\ 0, & \forall |\nu(t)| < \Delta, \end{cases} \\
\frac{dC_1(t)}{dt} &= \begin{cases} h_{c1} \nu(t) x_{\hat{o}1}(t), & \forall |\nu(t)| > \Delta, \\ 0, & \forall |\nu(t)| < \Delta, \end{cases} \\
\frac{dC_2(t)}{dt} &= \begin{cases} h_{c2} \nu(t) x_{\hat{o}2}(t), & \forall |\nu(t)| > \Delta, \\ 0, & \forall |\nu(t)| < \Delta, \end{cases} \\
\frac{dC_3(t)}{dt} &= \begin{cases} h_{c3} \nu(t) x_{\hat{o}3}(t), & \forall |\nu(t)| > \Delta, \\ 0, & \forall |\nu(t)| < \Delta, \end{cases}
\end{aligned}, \tag{9}$$

где $h_k = const > 0, h_{c1} = const > 0, h_{c2} = const > 0, h_{c3} = const > 0$ – некоторые числа, то требования критерия гиперустойчивости будут выполняться.

Так же аналогично [17] можно показать, что за счет выбора соответствующего коэффициента T_0 можно обеспечить L-диссипативность системы управления.

3. Имитационное моделирование

В качестве исследуемой системы возьмем объекты с передаточными функциями:

$$W_{\hat{i}\acute{o}1}(p) = \frac{0.00053p + 0.000002}{p^3 + 0.3p^2 + 0.0005p + 0.000003} e^{-60p} \tag{10}$$

$$W_{\hat{i}\acute{o}3}(p) = \frac{0.0019}{p^2 + 0.03p + 0.003} e^{-60p} \tag{11}$$

Отметим, что для примера используются передаточные функции разных порядков и с различным набором параметров, но с одной ЭМ и ФК, что позволит показать работоспособность построенного выше регулятора.

На рисунке 2 показаны динамические процессы для ОУ (10), на рисунке 3 такие же процессы для ОУ (11).

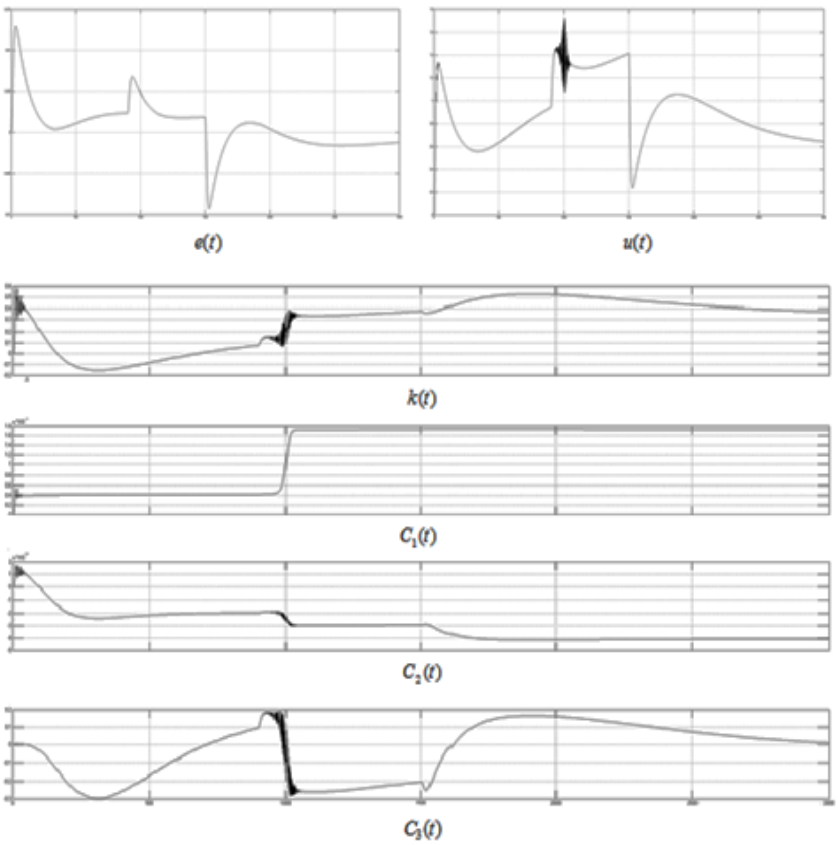


Рис. 2. Динамические процессы для ОУ (10)

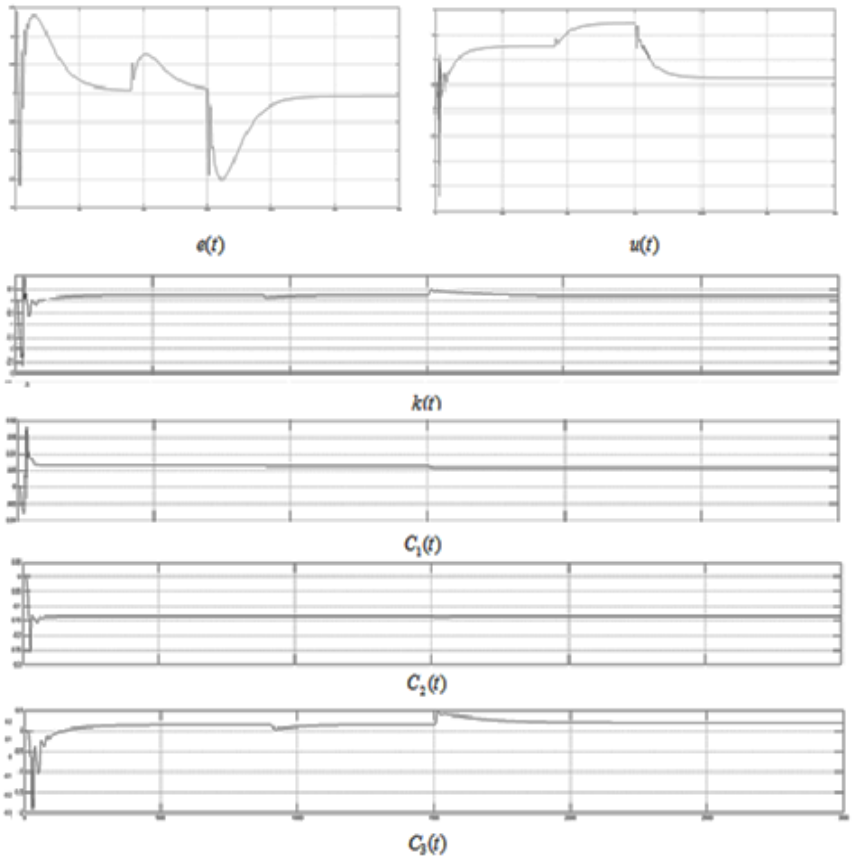


Рис.3. Динамические процессыдля ОУ (11)

Выводы

По результатам имитационного моделирования видно, что предложенные алгоритмы адаптивного управления обеспечивают хорошее качество управленияпри наличии запаздывания и изменении структуры и параметров объекта управления.

Библиографический список

1. Еремин Е.Л., Теличенко Д.А., Шеленок Е.А. Управление и автоматизация сложных систем в условиях неопределенности. – Благовещенск: Амурский гос. ун–т, 2015.
2. Клюев А.С., Лебедев А.Т., Новиков С.И. Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов. М.:Энергоатомиздат, 1985, 279 с.
3. Герасимов Д.Н., Никифоров В.О. Адаптивное управление крутящим моментом в инжекторных двигателях внутреннего сгорания // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – №5. – С.2-4.
4. Афанасьев В.Н., Окунькова Е.В. Гарантированное управление нелинейным объектом (на примере ядерного реактора на тяжелой воде) // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – №3. – С.47-55.
5. Колюбин С.А., Ефимов Д.В., Никифоров В.О., Бобцов А.А. Двухканальное адаптивное гибридное управление соотношением воздух-топливо и крутящим моментом автомобильных двигателей // Автоматика и телемеханика. – 2012. – №1. – С.42-59.
6. Монастырский В.Ф., Кирия Р.В., Брагинец Д.Д. Адаптивное управление подземным конвейерным транспортом с бункерами // Вестник Северо-Восточного фед. ун–та.им. М.К. Аммосова. – 2013. – №5. – С.50-52.
7. Мельников Д.В., Егупов Н.Д. Синтез систем регулирования энергетических турбин в условиях параметрической неопределенности // Известия Тульского гос. ун–та. – 2011. – №5-1. – С.108-113.
8. Митришкин Ю.В., Карцев Н.М. Стабилизация замкнутой системы управления с неопределенностью в переменных параметрах объекта// Вестник Московского гос. тех. ун–та.им. Н.Э. Баумана – 2009. – №4. – С.68-82.
9. Овчаренко В.Н Адаптивная идентификация параметров в динамических и статических системах // Автоматика и телемеханика. – 2011. – №3. – С.113-123.
10. Еремин Е.Л., Теличенко Д.А. Адаптивное и робастное управление объектами теплоэнергетики. – Благовещенск: Амурский гос. ун–т, 2009.
11. Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учеб.для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
12. Еремин Е.Л., Пикуль З.Д., Теличенко Д.А. Математическое описание и синтез адаптивного регулятора для структурно параметрически неопределенного объекта // Информационные технологии XXI века. Сборник научных трудов – Хабаровск. – 2013. – С.111-118.
13. Еремин Е.Л., Пикуль З.Д., Теличенко Д.А. Система управления температурой сушилки // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. Сборник трудов шестой Всероссийской науч. техн. конф. с международным участием. – Благовещенск. – 2013. – С.534-539.
14. Пикуль З.Д., Теличенко Д.А. Автоматизация процесса сушки руды в условиях структурно-пара-метрической неопределенности // Информатика и системы управления. – 2014. – №1–С.160-169.
15. Еремин Е.Л., Пикуль З.Д., Теличенко Д.А. Адаптивная система управления одним классом структурно-параметрически неопределенных объектов в схеме с явной и неявной эталонными моделями // Информатика и системы управления. – 2015. – №1–С.105-115.
16. Еремин Е.Л., Пикуль З.Д., Теличенко Д.А. Алгоритмы адаптации для одного класса структурно и параметрически неопределенных объектов с запаздыванием по управлению // Вестник ТОГУ. – 2015. – №2–С.101-112.
17. Еремин Е.Л., Еремин И.Е. Адаптивная система для объекта с запаздыванием по управлению в схеме с динамическим корректором и эталонным упредителем // Информатика и системы управления. – 2013. – №4–С.111-120.
18. Еремин Е.Л. L-диссипативностьгиперустойчивой системы управления при структурном возмущении 3 // Информатика и системы управления. – 2007. –№2 – С. 153-165.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ РАДОНА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ПРЯМЫХ ЛИНИЙ НА ИЗОБРАЖЕНИИ

В.В. Гусев, А.Б. Фельдман
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязанская область, Рязань gusevvladislav1995ya@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается задача применения преобразования Радона для выделения прямых линий на изображении.

Ключевые слова: преобразование Радона, OpenCV, фильтр выделения границ Canny, обнаружение прямых, локальные максимумы.

RADON TRANSFORM AND ITS APPLICATION TO ALLOCATION OF DIRECTLINES ON THE IMAGE

V.V. Gusev, A. B. Feldman
Ryazan state radioengineering university,
Russia, Ryazan region, Ryazan, gusevvladislav1995ya@yandex.ru

Abstract. The problem of the application of the Radon transform to extract the straight lines in the image.

Keywords: Radon, the OpenCV, filter selection borders Canny, detection of direct, local maximums.

Введение

Обнаружение прямолинейных границ – одна из задач компьютерного зрения, которая решается в настоящее время с использованием большого количества подходов. Одним из перспективных направлений в этой области является использование алгоритмов на основе структурного анализа изображений. В соответствии с ними изображение объекта рассматривается как комбинация геометрических примитивов, таких как точки, прямые, дуги эллипсов и т.д.

Для обнаружения прямолинейных границ объектов часто используют преобразование Радона. В этой работе под прямолинейной границей объекта на изображении будет пониматься область сильного перепада яркости изображения, состоящая из пикселей, лежащих вдоль одной прямой. Однако в случае большого количества прямолинейных границ, либо значительного уровня шума вероятность ложного обнаружения сильно возрастает. Известны различные пути увеличения устойчивости преобразования Радона к шумам на исходном изображении, например, такие как подбор подходящего фильтра выделения границ на исходном изображении. Наиболее подходящим фильтром выделения границ, который использован в этой работе, является фильтр Canny.

1. Алгоритм обнаружения прямолинейных границ на основе преобразования Радона

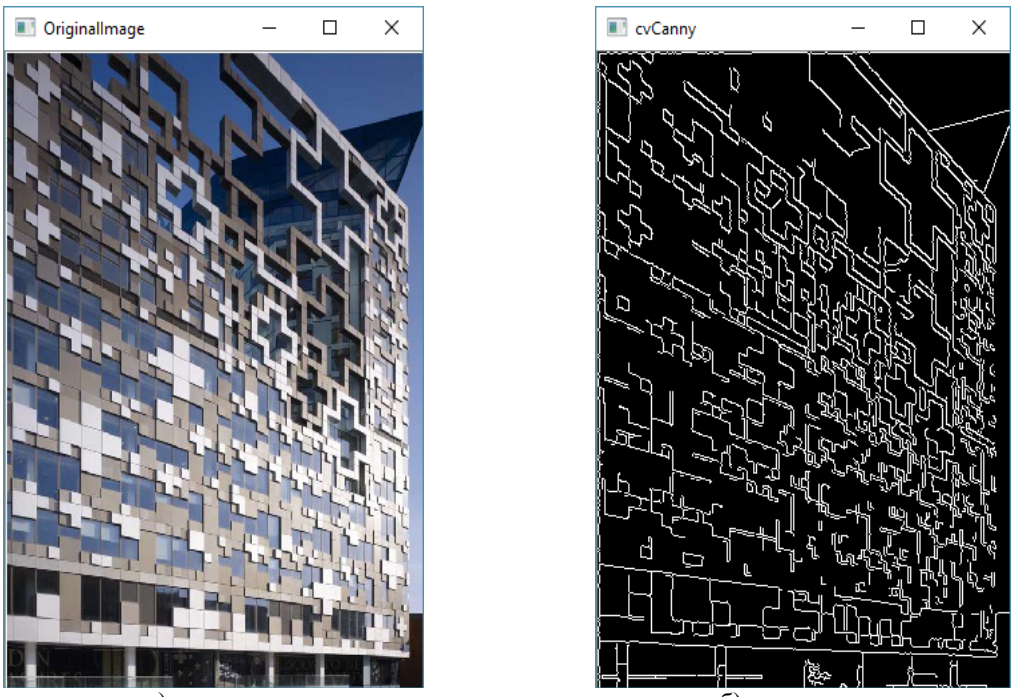
Алгоритм, использующий результат преобразования Радона для обнаружения прямолинейных границ, включает следующие этапы:

1. Исходное изображение предварительно обрабатывается фильтром Canny для выделения границ.
2. На основе полученного изображения выполняется преобразование Радона исходного изображения.
3. Производится поиск локальных максимумов преобразования Радона, предварительно задавшись количеством n этих максимумом.
4. Затем осуществляется выделение n линий на исходном изображении.

Рассмотрим этот алгоритм более детально на примере.

Как правило, наиболее существенная информация о наблюдаемой сцене заключена в контурах изображения. Контуры содержат всю необходимую информацию о форме объектов, присутствующих на изображении, и операция выделения контуров очень часто облегчает последующий анализ наблюдаемой сцены (как визуальный, так и автоматический).

Применив фильтр выделения границ Canny, получим бинарное изображение, содержащее границы (рис. 1-б).



а) б)

Рис. 1. Пример работы функции **cvCanny()** библиотеки OpenCV: исходное изображение (а); результат работы функции **cvCanny()** (б)

После обработки исходного изображения фильтром Canny для выделения границ получено новое изображение, которое подвергается преобразованию Радона. Затем в параметрическом пространстве преобразования отыскиваются локальные максимумы, косвенно указывающие на присутствие прямолинейной границы на исходном изображении [1].

Преобразование Радона для случая непрерывного двумерного изображения $f(x, y)$, *содержащего выделенные границы:*

$$R(s, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} f(s \cdot \cos\alpha - z \cdot \sin\alpha, s \cdot \sin\alpha - z \cdot \cos\alpha) dz,$$

где $R(s, \alpha)$ – результат преобразования; (s, α) – параметры прямой, вдоль которой проводится интегрирование.

Если взять изображение светлого отрезка, лежащего на прямой с параметрами (s', α'), на чёрном фоне, то результатом преобразования Радона этого изображения будет полутоновое изображение с глобальным максимумом в точке (s', α'). Если отрезков несколько, и они имеют различные расположение, ориентацию и уровни яркости, то преобразование Радона может быть определено по принципу суперпозиции как результат наложения преобразований Радона от изображения каждого из отрезков в отдельности. В этом случае на результирующем изображении будет несколько локальных максимумов, многим из которых будут соответствовать параметры (s, α) отрезков на исходных изображениях. Таким образом, присутствие ярко выраженного локального максимума в точке (s, α) преобразования Радона позволяет предположить наличие одного или нескольких светлых отрезков, лежащих на прямой с параметрами (s, α), на исходном изображении.

Здесь и далее на изображении преобразования Радона (рис. 2) ось абсцисс соответствует углу α прямой на изображении, а ось ординат – сдвигу s прямой относительно центра исходного изображения (рис. 1-а).

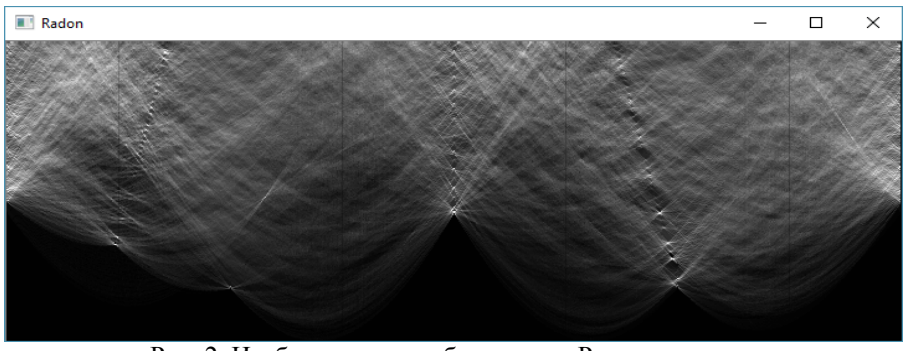


Рис. 2. Изображение преобразования Радона

Поиск локальных максимумов выполняется с учётом особенностей преобразования Радона [2]. Предполагается, что количество искомых границ на изображении известно заранее. Составляется предварительный список всех локальных максимумов преобразования Радона в порядке убывания их значений. В окончательный список локальных максимумов поочерёдно добавляются максимумы из предварительного списка, начиная с самого первого элемента. При этом для снижения вероятности обнаружения двух близких максимумов, соответствующих одной прямой, для каждого нового максимума, претендующего на добавление в окончательный список, проверяется условие:

$$\left(\left|S_i - S_j\right| \geq {}_{\Delta}S_{min}\right) \vee \left(\left|\alpha_i - \alpha_j\right| \geq {}_{\Delta}\alpha_{min}\right), \quad (1)$$

где (S_i, α_i) – координаты проверяемого максимума; (S_j, α_j) – координаты максимума из окончательного списка; ${}_{\Delta}S_{min}$ и ${}_{\Delta}\alpha_{min}$ – минимально допустимые расстояния по осям S и α соответствено; $\alpha_i, \alpha_j \in [\,0, 360°)$, $S_i, S_j \in [\,0, \frac{d}{2}]$, где d – длинна диагонали исходного изображения в пикселях.

Очередной максимум (S_i, α_i) сравнивается на близость по выражению (1) с каждым максимумом (S_j, α_j), уже принадлежащим окончательному списку. Если выражение (1) выполняется для каждого (S_j, α_j), то (S_i, α_i) добавляется в окончательный список максимумов. Алгоритм выполняется до тех пор, пока количество максимумов в окончательном списке не достигнет заданного числа, либо предварительный список не подойдёт к концу.

На рисунке 3 можно наблюдать изображение преобразования Радона с отмеченными локальными максимумами, соответствующими найденным прямолинейным границам, а на рисунке 4 можно наблюдать обнаруженные прямолинейные границы на исходном изображении (рис. 1, а).

2. Программная реализация алгоритма обнаружения прямолинейных границ на основе преобразования Радона

Программная реализация алгоритма обнаружения прямолинейных границ была осуществлена с использованием языка программирования C++ и библиотеки машинного зрения OpenCV в среде программирования Microsoft Visual Studio 2015.

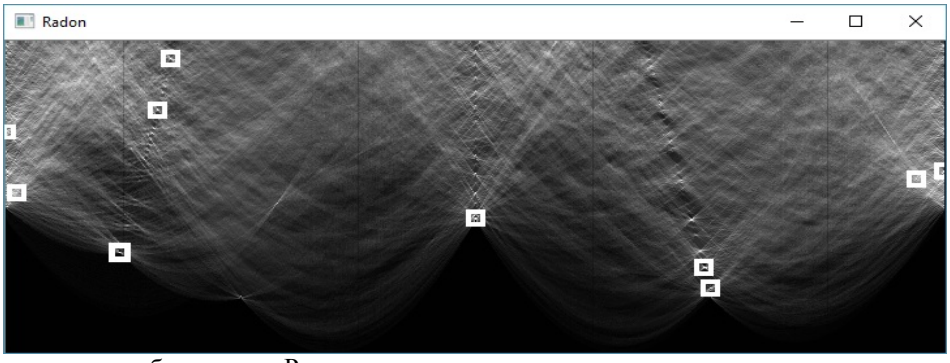


Рис. 3. Изображение преобразования Радона с отмеченными локальными максимумами, соответствующими найденным прямолинейным границам

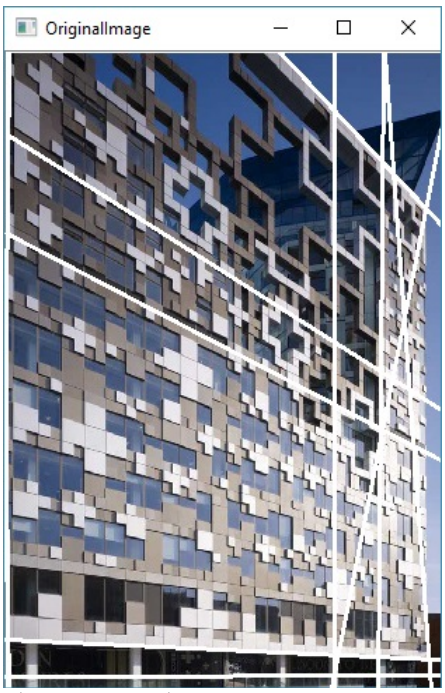


Рис. 4. Исходное изображение с обнаруженными прямолинейными границами

Программа снабжена графическим пользовательским интерфейсом, позволяющим в интерактивном режиме задать параметры работы алгоритма и отображения промежуточных и конечных результатов (изображений). Перечислим основные настройки.

Параметры детектора Canny (функция cvCanny() библиотеки OpenCV:

- Threshold1 – порог минимума функции cvCanny();
- Threshold2 – порог максимума функции cvCanny();
- Sobel op – размер для оператора Собеля (может принимать значения только 3, или 5).

Параметры отображения результата преобразования Радона:

- Contrast – отвечает за контраст изображения преобразования Радона (алгоритм визуализации умножает значение яркости каждого пикселя получившегося изображения на данное значение);
- Brightness - отвечает за яркость изображения преобразования Радона (алгоритм визуализации прибавляет к значению яркости каждого пикселя получившегося изображения данное значение);
- Angle Step – определяет шаг угла α прохода по всем пикселям при формировании изображения преобразования Радона или, другими словами, количество пикселей (ширину) изображения преобразования Радона.

Параметры поиска локальных максимумов преобразования Радона

- Lines – количество линий на оригинальном изображении, которое мы предполагаем найти;
- Distance – минимально допустимые расстояния между локальными максимумами преобразования Радона по осям S и α соответственно ($_{\Delta}S_{min}$, $_{\Delta}\alpha_{min}$).

3. Пример работы программы

На рисунке 5 приведены примеры работы алгоритма обнаружения прямолинейных границ с помощью преобразования Радона.

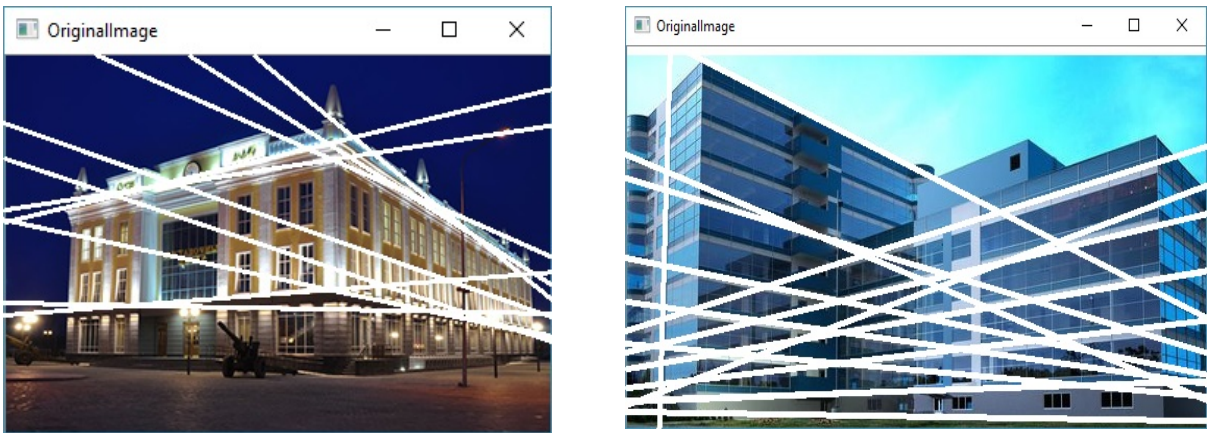


Рис. 5. Примеры обнаружения прямолинейных границ с помощью преобразования Радона

Выводы

В результате выполнения работы была разработана программа для выделения прямых линий на изображении с помощью преобразования Радона. Исходное изображение предварительно обрабатывается фильтром выделения границ Canny, а результат подвергается преобразованию Радона. Затем на полученном изображении преобразования Радона ищутся локальные максимумы, указывающие на присутствие прямолинейных границ на исходном изображении.

Алгоритм преобразования Радона может быть использован в компьютерной томографии или в системах видеослежения для оценки сдвига изображения в области интереса.

Работа выполнена на средства гранта Президента РФ для государственной поддержки Ведущих научных школ РФ НШ-7116.2016.8.

Библиографический список

1. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Шубин Н.Ю. Алгоритм оценки координат объектов на основе преобразования Радона // Цифровая обработка сигналов. – 2011. – №3. – С. 17-20.
2. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. – М.: Радиотехника, 2008. – С. 176: ил.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРЫ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВИДЕОКАМЕР

М.Н. Князев, А.Б. Фельдман
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, aitu@rsreu.ru

Аннотация. В данной работе описано решение задачи обнаружения препятствий при использовании двух синхронизированных между собой камер, представляющих собой стереопару.

Ключевые слова: стереокамера, обнаружение препятствий

OBSTACLE DETECTION USING TWO SYNCHRONIZED VIDEO SENSORS

M. Knyazev, A. Feldman
Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, aitu@rsreu.ru

Abstract. This article deals with the solution of obstacle detection problem with using of two synchronized video sensor as stereo pair.

Keywords: stereo camera, obstacle detection

В докладе рассматриваются проблемы установления геометрического соответствия между изображениями, формируемыми каждой из камер, составляющих стереопару, а также восстановления на этой основе трехмерной геометрии наблюдаемой сцены.

Эту задачу можно разделить на несколько частей:

- Калибровка камер.

- Геометрические преобразования изображений.
- Построение карты глубины.
- Построение карты препятствий.
- Фильтрация шумов и ошибок.

Первое, что должно быть сделано перед работой со стереопарой – это калибровка. Она производится с помощью калибровочного объекта, которым в данном случае является шахматная доска. Стоит отметить, что шахматная доска должна быть обязательно прямоугольной формы (рис. 1).

Рис. 1. Примеры калибровочных объектов

Произведя съёмку калибровочного объекта под разными углами по отношению к камерам, выделяем пары изображений (рис. 2), на основе которых получим калибровочные матрицы к каждой из камер, расположение их в пространстве, а также ряд других параметров.

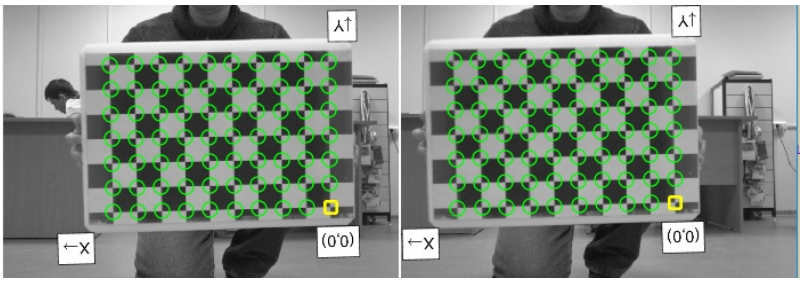


Рис. 2. Пара изображений с калибровочным объектом

Имея калибровку, а также изображения с каждой из камер, выполним ректификацию изображений. Получив выравненные изображения (рис. 3), можем построить карту глубины. Для каждой точки на первом изображении необходимо найти пару на другом, далее для каждой из пар выполняется триангуляция, из которой получаем расстояние до плоскости камеры [1]. Выполнив подобные действия для каждой пары точек, получим карту глубины (рис. 4).

Рис. 3. Пара ректифицированных изображений

Рис. 4. Карта глубины

На основе карты глубины, ректифицированных изображений, а также калибровочных матриц каждой из камер восстановим 3D-сцену, которую наблюдаем на исходных изображениях (рис. 5). Эта сцена представлена трехмерным облаком точек, которое далее будет использоваться в качестве основы для построения карты препятствий.

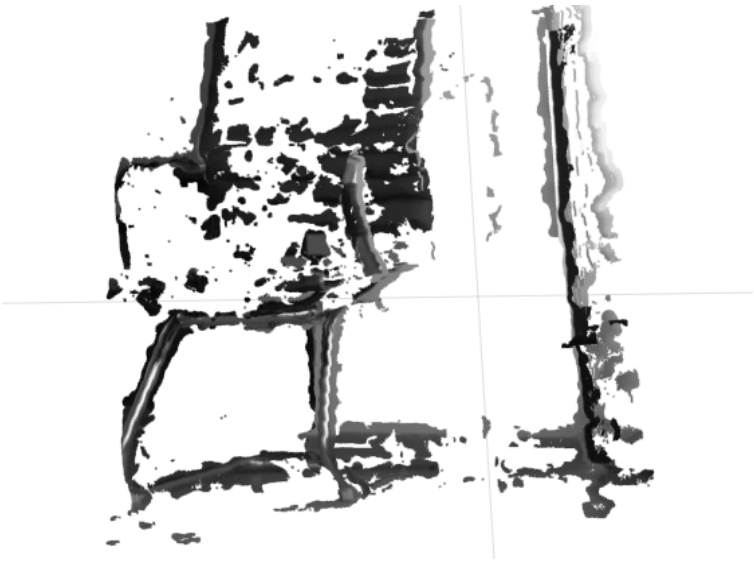


Рис. 5. Восстановленная 3D-сцена

Восстановленная сцена выглядит неидеально, но этого достаточно, чтобы судить о наличии препятствия впереди.

Следующим шагом будет построение самой карты препятствий. Для этого берется полученное на предыдущем шаге трехмерное облако точек с координатами XYZ, где X обозначает ширину, Y - высоту, а Z - дальность. Производится проецирование этих точек на плоскость XOZ, то есть не учитывается высота (рис. 6).

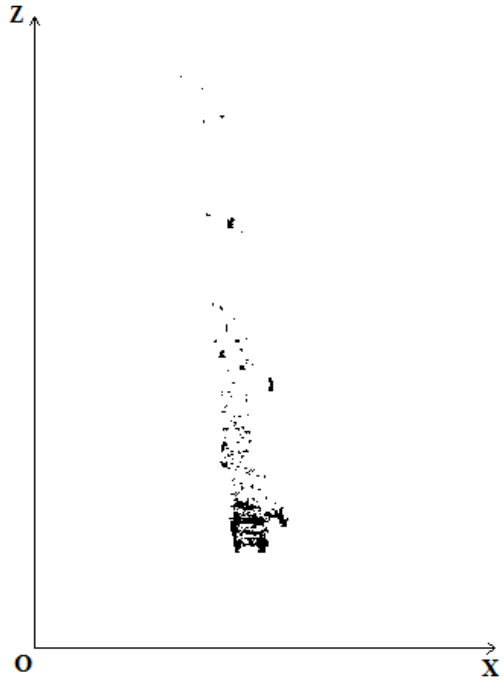


Рис. 6. Карта препятствий

Как можно заметить, полученная карта не совсем корректна. Имеется достаточное число ошибок, но препятствие можно разглядеть – оно выглядит как самое плотное скопление точек. Для того чтобы исправить ситуацию, применим морфологическую фильтрацию (рис. 7). Здесь препятствие видно чётко, ошибки отсутствуют. Для удобства отмечен угол обзора.

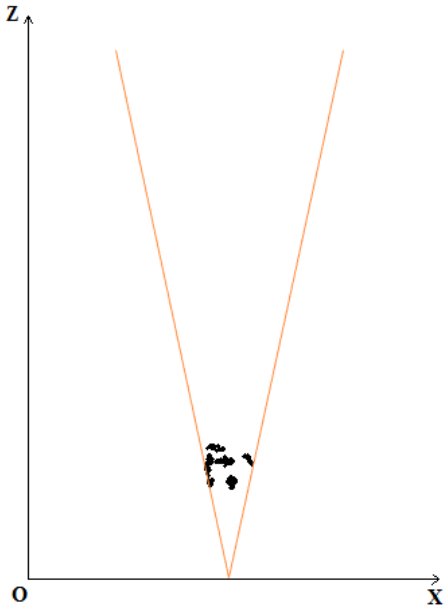


Рис. 7. Карта препятствий после морфологической обработки

Работа выполнена при с использованием средств Гранта для поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-7116.2016.8).

Библиографический список

1.Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.

2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений – М.: 2012. - 1104 с.

УДК 004.932.72'1; ГРНТИ 28.23.15

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ И ВЫДЕЛЕНИЯ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ УЧАСТКОВ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

М.В. Муравьева
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, ritatyi@list.ru

Аннотация. Рассматривается два алгоритма обнаружения и выделения объектов: для неподвижного и подвижного фона. Проведено исследование работы алгоритмов при различных условиях.

Ключевые слова: выделение объектов, корреляционные алгоритмы, слежение за объектом

DETECTION ALGORITHM AND THE ALLOCATION OF PLOTS IN THE CHANGIGNG IMAGE SEQUENCE

M.V. Muravyova
Ryazan State Radio Engineering University
Russia, Ryazan, ritatyi@list.ru

Abstract. We consider the two algorithms have been found: for the fixed and movable background. The research of the algorithmic work in different conditions has been done.

Keywords: selecting objects, correlation algorithms, object tracking

Введение

Цифровая обработка изображений является одной из наиболее актуальных и быстро развивающихся областей науки и техники. Это связано с тем, что существует множество задач, которые требуют анализа визуальной информации. Одной из важных задач является обнаружение и выделение изменяющихся участков в последовательности изображений.

Для получения информации о положении объекта в поле зрения оптической следящей системы используют разнообразные устройства: от наиболее простых, содержащих несколько расположенных рядом фотоприемников, до достаточно сложных устройств со сканированием изображения и модуляционной обработки применяемого сигнала. При этом в подавляющем большинстве практических приложений приходится решать задачу определения координат объекта на изображении.

Для устойчивого слежения за объектом решающее значение имеет выбор алгоритма определения координат объекта. Выбор конкретного алгоритма ограничен необходимостью учета следующих основных особенностей указанной задачи:

1) наличие на естественных изображениях сложного, неоднородного фона сильно затрудняет обнаружение и оценку параметров объекта, особенно при слабых контрастах и малых отношениях сигнал-шум;

2) малый объем или полное отсутствие априорных сведений об объекте (из-за огромного разнообразия всевозможных объектов) сильно затрудняет разработку алгоритма отделения потенциального объекта от фона.

Так как из априорных сведений имеются только минимальные и максимальные размеры объекта, то такой алгоритм можно построить с помощью корреляционно-экстремального алгоритма определения координат объекта, основанного на использовании разностной критериальной функции.

Этот алгоритм получил распространение по той причине, что позволяет с наименьшими вычислительными затратами наиболее просто оценивать координаты объекта.

1. Корреляционные методы

Классический способ совмещения двух изображений состоит в том, что формируется величина, измеряющая корреляцию между этими изображениями и находится положение максимума функции корреляции.

Пусть имеются два изображения. Представим их в виде массивов $F_1(j,k)$ и $F_2(j,k)$. Требуется совместить эти изображения. В простейшей форме мера корреляции определяется следующим образом:

$$E(m,n)=\frac{\sum_{j=1}^{R}\sum_{k=1}^{R}F_1(j,k)F_2(j-m,\ k-n)}{\left[\sum_{j=1}^{R}\sum_{k=1}^{R}F_1{}^2(j,k)\right]^{1/2}\left[\sum_{j=1}^{R}\sum_{k=1}^{R}F_2{}^2(j-m,\ k-n)\right]^{1/2}},$$

где (j, k) – индексы элементов в окне W размером R×R элементов, которое расположено внутри зоны поиска S размером M×M элементов.

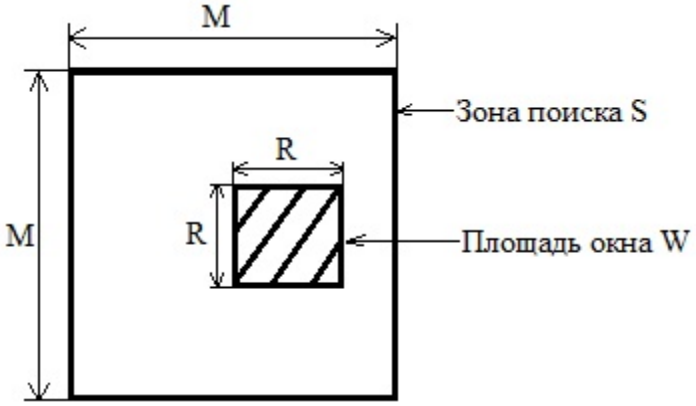


Рис. 1. Соотношение между зоной поиска S и окном W

На рисунке 1 показано соотношение между зоной поиска и окном. Функцию корреляции требуется вычислить для всех (M-R+1)(M-R+1) возможных смещений окна в зоне поиска для того, чтобы определить её максимальное значение и, таким образом, совместить два изображения.

Применение этой простой меры корреляции может вызвать трудности: функция корреляции может иметь довольно размытый максимум, что затрудняет его обнаружение, шум на корреляции может скрыть максимум корреляции и требуется выполнять большой объем вычислений. Эти трудности привели к поиску других функций, которые смогли бы давать оценку величины различия изображений при меньших затратах на вычисления [1].

Такими функциями оказались разностные критериальные функции вида

$$F(m,n)=\sum_{j=1}^{R}\sum_{k=1}^{R}|F_1(j+m,k+n)-F_2(j,k)| \quad \text{и}$$

$$F(m,n)=\sum_{j=1}^{R}\sum_{k=1}^{R}\left(F_1(j+m,k+n)-F_2(j,k)\right)^2.$$

С их помощью можно найти минимальное различие между изображениями. Преимуществом разностных функций перед корреляционными является отсутствие в них операции умножения, что позволяет снизить вычислительные затраты в 4÷10 раз.

2. Алгоритм выделения изменяющихся участков в последовательности изображений для подвижного фона

Для данного алгоритма исходными данными являются последовательность изображений, предполагаемые максимальные размеры изменяющегося участка и сдвига фона.

Из-за того, что фон смещается (из-за движения искомого объекта относительно фона), то первоначально стоит задача найти соответствующие участки (i+1)-го и i-го изображений. Если удастся определить на сколько сдвигается фон из кадра в кадр, то можно найти эти соответствующие участки.

Алгоритм выделения изменяющихся участков в последовательности изображений для подвижного фона разработан на основе использования функции вида [3]:

$$F(m,n,\alpha,\beta)=(F_1-F_2)\rightarrow \min, \qquad (1)$$

где

$$F_1(m,n) = \sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{N}|I_1(j+m,k+n) - I_2(j,k)|, \qquad (2)$$

где значения высту- $m,n = \overline{0 \div 2P+1}$ пают в качестве координат соответствующего участка фона;

$$F_2(\alpha,\beta) = \sum_{h=1}^{M}\sum_{s=1}^{M}|T_1(h+\alpha,s+\beta) - T_2(h,s)| \rightarrow max, \qquad (3)$$

где значения , $\alpha,\beta = \overline{0 \div M-L+1}$ при которых достигается максимум функции F_2, принимаются за координаты участков двух кадров наиболее отличающихся друг от друга.

Для того, чтобы сравнить два изображения и найти изменяющийся участок, выполняется ряд действий:

1. Задается величина P- это максимально возможное смещение фона i+1-го кадра относительно i-го кадра.
2. Выделяется часть i-го изображения- D_1, то есть такая часть, отступы которой от границ изображения будут равны P. Эта часть выделена пунктирной рамочкой на рисунке 2.

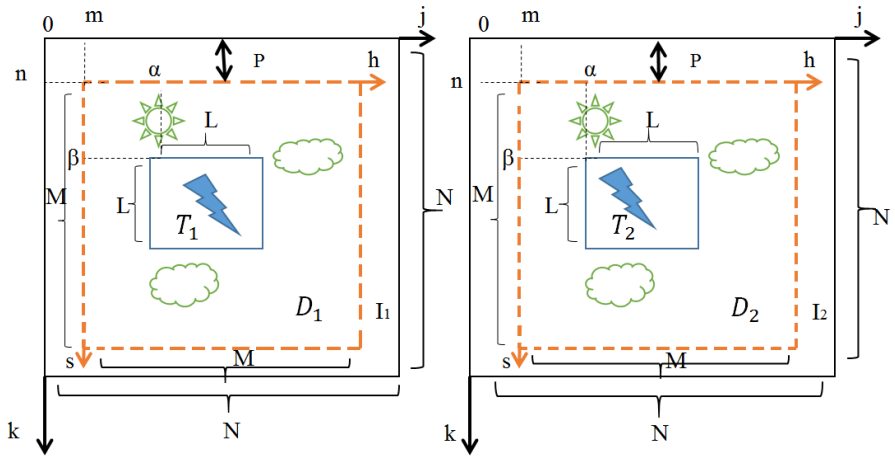


Рис. 2. Сравнение изображений

3. Далее сравнивается с помощью функции (2) изображение D_1 с некоторым участком (i+1)-го изображения, который имеет такие же размеры m×n.
4. Задаются максимальные возможные размеры поиска изменяющегося участка- L×L.
5. Изменяя координаты этого участка (α, β) изображений D_1 и D_2 , с помощью функции (3) находятся такие значения координат (б, β), в которых эти участки T_1 и T_2 наиболее согласуются.
6. Пункты 3,4,5 повторяются для всех возможных значений (m, n), определяя минимум функции (1). Минимизируя значение функции (1) одновременно находится смещение фона (m, n) и координаты участка в этих кадрах (α, β), которые наибольше отличаются друг от друга

В итоге работы этого алгоритма будут найдены значения смещения фона в i-м и (i+1)-м кадрах (m, n) и координаты участков в этих кадрах, которые наиболее отличаются друг от друга (из-за наличия в них движущегося объекта).

Таким образом, данный алгоритм напоминает классический корреляционный разностный алгоритм, вычисляющий минимум отличия изображений D_1 и D_2, но при вычислении разностной критериальной функции не учитываются точки небольших участков T_1 и T_2 этих изображений, которые наиболее сильно отличаются друг от друга, тем самым, удается сни-

зить влияние движущегося объекта в этих изображениях на точность совмещения соответствующих участков фона. Совместив соответствующие участки фона в i-ом и i+1-ом кадрах в дальнейшем можно перейти к вычислению разностного изображения, бинарного разностного изображения, как это было в алгоритме для неподвижного фона.

3. Экспериментальные исследования

Для исследования разработанного алгоритма рассматриваться 3 варианта последовательностей: с чёрным объектом, с серым объектом и с белым объектом. В каждой последовательности по 70 кадров. Известны реальные координаты объекта в каждом кадре.

Во время проведения экспериментального исследования загружается i-ое и (i+1)-е изображения. Идет поиск объекта на (i+1)-м изображении. Находятся координаты объекта. Считается ошибка нахождения координат объекта. Выводятся графики.

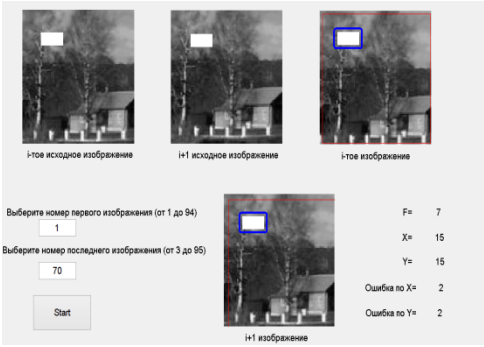


Рис. 3. Последовательность изображений с белым объектом

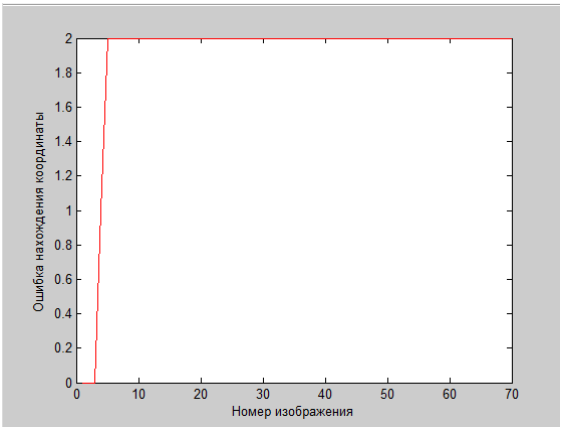


Рис. 4. Ошибка по оси X

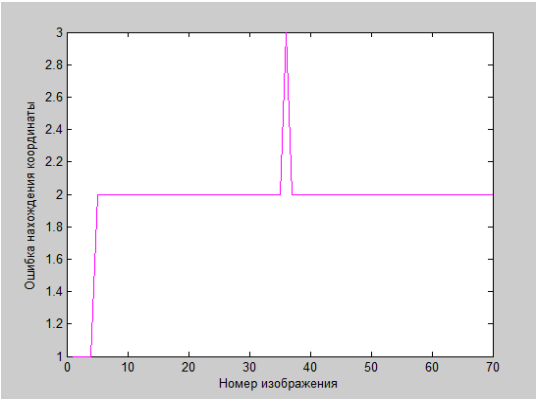


Рис. 5. Ошибка по оси Y

В ходе проведения экспериментального исследования срыва работы алгоритма не было обнаружено.

Для исследования помехоустойчивости разработанного алгоритма будут рассматриваться 3 варианта последовательностей: с чёрным объектом, с серым объектом и с белым объектом. В каждой последовательности по 70 кадров. Известны реальные координаты объекта в каждом кадре.

Во время проведения экспериментального исследования загружается i-е и (i+1)-е изображения. Искажаются шумом. Идет поиск объекта на (i+1)-м изображении. Находятся координаты объекта. Считается ошибка нахождения координат объекта. Выводятся графики.

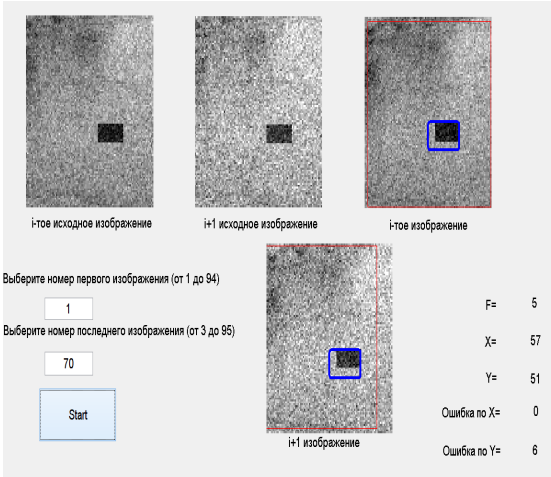


Рис. 6. Последовательность изображений с черным объектом

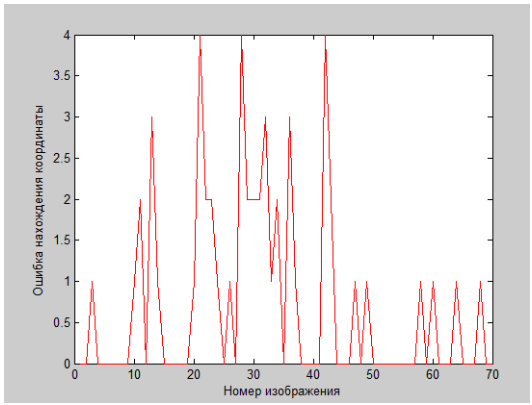


Рис. 7. Ошибка по оси X

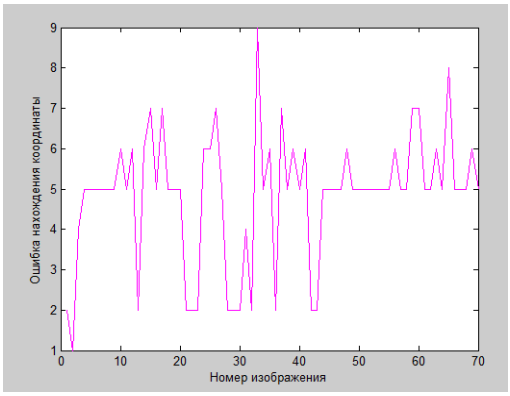


Рис. 8. Ошибка по оси Y

Алгоритм работоспособный при СКО до 0.1. При большей СКО происходит срыв.

Выводы

В данной статье рассмотрен корреляционно-экстремальный алгоритм определения координат объекта, основанного на использовании разностной критериальной функции с помощью программы (m-функций) в системе Matlab, с помощью которой были реализованы два алгоритма выделения изменяющихся участков в последовательности изображений и произведено экспериментально исследование алгоритмов.

Используемый алгоритм совмещения сдвинутых участков фона позволяет эффективно выделять на нём движущиеся объекты, однако, он требует большого количества операций и его целесообразно использовать в тех случаях, когда отсутствуют жесткие ограничения на быстродействие алгоритма. Данный алгоритм хорошо работает для неоднородного фона. Другим условием его эффективного функционирования является наличие исходной информации о максимально возможном сдвиге фона в разных кадрах и максимально возможных размерах предполагаемого движущегося объекта.

Работа выполнена под научным руководством А.А. Селяева.

Библиографический список

1. Гонсалесс Р., Вудс Р. «Цифровая обработка изображений» - М.: Техносфера, 2006.
2. Алпатов Б.А., Либияйнен Э.Т., Селяев А.А. Алгоритм выделения изменяющихся участков изображения. Рязань: РРТИ, 1989г.

УДК 004.932.2; ГРНТИ 28.23.15

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА НА ПОДВИЖНОМ ФОНЕ

С.М. Ларионов, А.А. Селяев
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, г.Рязань, sergej.larionov.94@mail.ru

Аннотация. В данной работе рассматривается задача определения местоположения движущегося объекта на подвижном фоне. Предлагается возможный алгоритм решения поставленной задачи. Описаны результаты экспериментальных исследований. Приводятся направления практического использования данного алгоритма.

Ключевые слова: местоположение объекта, движущийся объект, подвижный фон, метод сопоставления с эталоном, разностное изображение.

ALGORITHM OF MOVING OBJECT LOCATION DETECTION ON MOVING BACKGROUND

S.M. Larionov, A.A. Selyaev
Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, sergej.larionov.94@mail.ru

Abstract. In this paper task of moving object location detection on moving background is studied. Algorithm of this task solution is offered. Results of experimental researches are described. Areas of practical application of this algorithm are given.

Keywords: object location, moving object, moving background, template matching algorithm, template matching method, differential image.

Обработка изображений является одной из передовых областей науки и техники, имеющей в настоящее время важное прикладное значение как для многих отраслей промышленного производства, так и для повседневной жизни. Весь спектр задач, возникающих в данной области, можно условно разделить на задачи улучшения качества получаемых снимков и задачи анализа изображений.

При анализе сцены зачастую возникает проблема определения местоположения движущегося объекта. Данная задача является весьма актуальной для систем технического зрения роботов, в системах автоматизации технологических процессов, в системах видеонаблюдения др. При решении поставленной задачи зачастую используют алгоритм выделения движущегося объекта на основе межкадровой разности [2], в основе которого лежит поточечное сравнение двух изображений G_n и G_{n+1}, полученных в различные моменты времени, заключающееся в формировании разностного изображения согласно следующему выражению:

$$D(i,j)=\begin{cases}1, \left|G_n(i,j)-G_{n+1}(i,j)\right|>E \\ 0, \text{ èíà÷å}\end{cases}, \qquad (1)$$

где $D(i,j)$ – значение разностного изображения D в точке (i,j); $G_n(i,j)$, $G_{n+1}(i,j)$ – значение яркости точки (i,j) n-го и $(n+1)$-го изображений G_n и G_{n+1}, полученных в n-й и $(n+1)$-й моменты времени соответственно; E – порог изменения яркости в точке за время между моментами получения сравниваемых изображений.

Параметр E используется для того, чтобы единичные точки разностного изображения D соответствовали изменениям, связанными именно с движением объекта интереса, а не с шумовыми явлениями, поэтому значение E обычно определяют исходя из величины шума на анализируемых изображениях. В общем случае порог E может быть различным для каждой отдельной точки. Изображение D представляет собой бинарное изображение. После начального формирования разностного изображения с целью повышения точности определения положения объекта возможно применение морфологической обработки [1] для удаленных разрозненных точек или мелких сегментов, идентифицированных как объект интереса, для решения проблемы развала сегмента, для устранения пропущенных областей внутри сегмента и т. п. Результаты применения описанного разностного метода обнаружения движущегося объекта для пары тестовых изображений приведены на рисунках 1-2. В качестве объекта на данных изображениях выступил темный прямоугольник. Было смоделирова-

но движение объекта, в результате чего на втором кадре прямоугольник оказался смещен относительно своего первоначального положения.

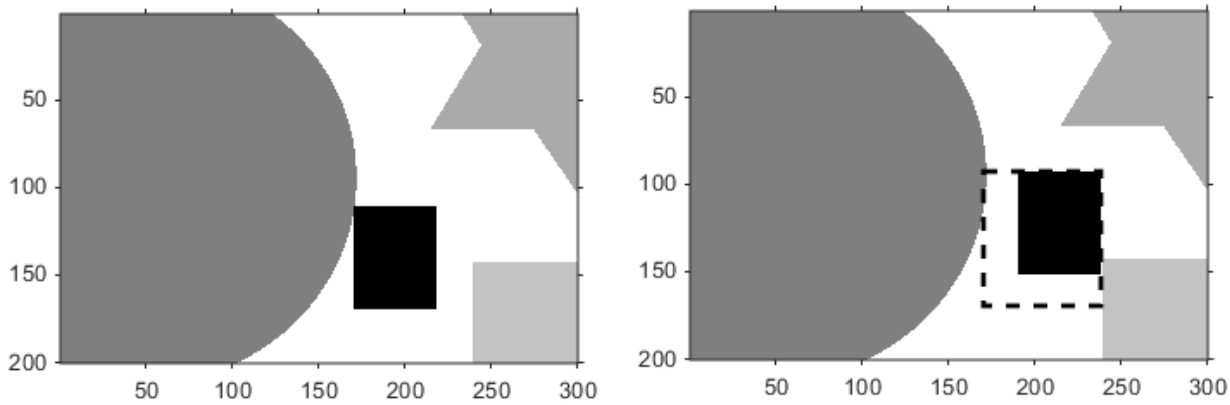


Рис. 1. Сравниваемые изображения (неподвижный фон)

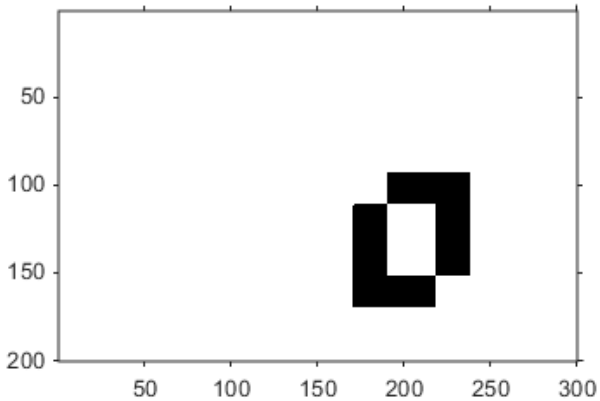


Рис. 2. Разностное изображение *D* при использовании алгоритма (1) для неподвижного фона

В результате применения алгоритма (1) к данной паре сравниваемых изображений было получено бинарное изображение, представленное на рисунке 2. Как можно заметить, сегмент бинарного изображения, соответствующий движущемуся объекту, имеет "дырку" в центре, что объясняется однородностью яркости объекта и тем, что изображения объекта на первом и втором снимках имеют область перекрытия. То есть точки объекта сместились, и на их месте оказались уже другие точки, но в силу того, что яркости точек совпадают, алгоритм не выделил данный участок изображения. Однако в большинстве прикладных задач достаточно указать некоторую область, в которой расположен объект, при этом размеры этой области могут несколько превосходить размеры самого объекта. На втором изображении (рис. 1) штриховой линией указана данная область.

Однако такой алгоритм надежно решает поставленную задачу в случае неподвижного фона, и даже небольшое его смещение может привести к грубым ошибкам. В случае же когда сам датчик изображения находится, например, на некотором подвижном носителе, описанный разностный алгоритм становится неработоспособным. На рисунках 3-4 приведены результаты моделирования движения датчика изображений и результаты экспериментальных исследований алгоритма (1) для данного случая.

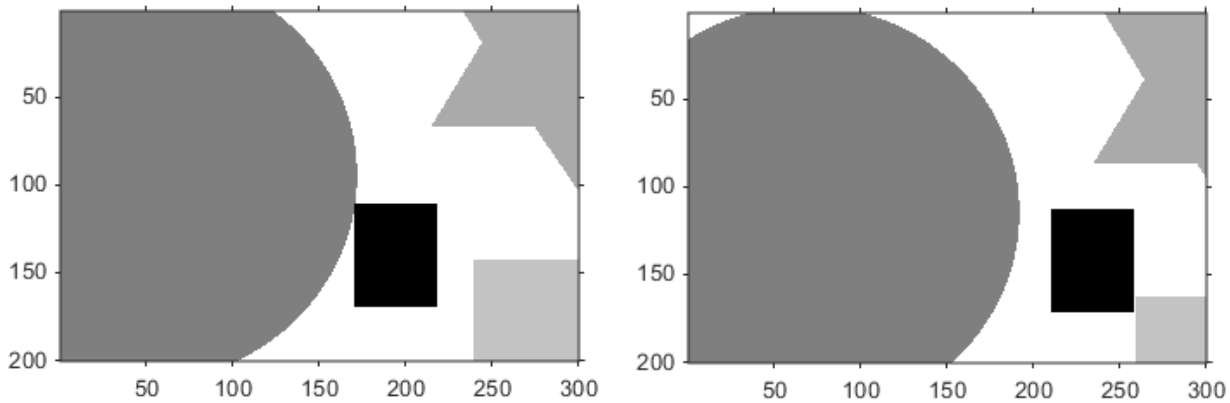


Рис. 3. Сравниваемые изображения (подвижный фон)

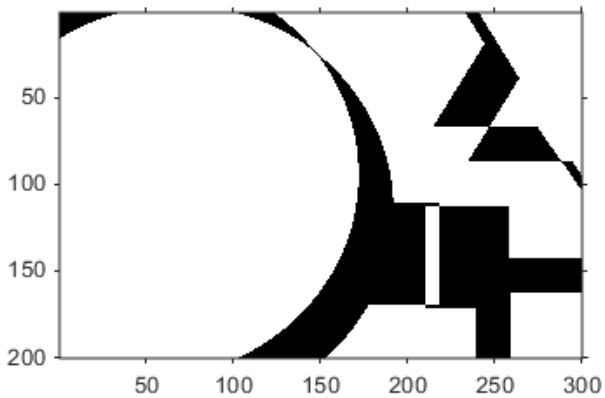


Рис. 4. Разностное изображение D при использовании алгоритма (1) для подвижного фона

Для решения данной проблемы предлагается использовать следующий алгоритм. Исходя из технических характеристик подвижного носителя, на котором расположен датчик изображений, можно определить максимально возможное смещение фона в пикселях за время между кадрами, а, следовательно выделить в изображении G_n некоторый опорный участок W_n, который, как предполагается, сдвигается в изображении G_{n+1}.

Для определения местоположения объекта необходимо оценить смещение опорного участка W_n n-го кадра в (n+1)-м кадре. Для сравнения изображений и нахождения координат опорного участка может быть использован метод сопоставления с эталоном [2]. Данный метож заключается в нахождении экстремума некоторой критериальной функции. Применительно к условиям решаемой задачи может быть использована критериальная функция вида, представленного ниже:

$$F(a,b) = \sum_{(i,j)\in W_n} \left(W_n(i,j) - G_{n+1}(i+a, j+b)\right)^2 , \qquad (2)$$

где $F(a, b)$ – значение критериальной функции для области с координатами (a, b) изображения G_{n+1}; $W_n(i, j)$ – значение яркости точки (i, j) опорного изображения W_n; $G_{n+1}(i+a, j+b)$ – значение яркости точки $(i+a, j+b)$ анализируемого изображения G_{n+1}.

Однако следует учесть, что в изображение W входит также и изображение объекта, которое при сопоставлении участка W в кадрах G_n и G_{n+1} желательно исключить, чтобы избежать ошибки при определении искомого смещения. Зачастую имеются априорные данные о размерах объекта и скорости его движения, что позволяет задать некоторое скользящее окно $L(x, y)$ в сравниваемых участках изображений G_n и G_{n+1}. На рисунке 5 для представленной выше пары сравниваемых изображений (рис. 3) область W указана штрих-пунктирной линией, а найденная позиция окна $L(x, y)$ отмечена штриховой линией.

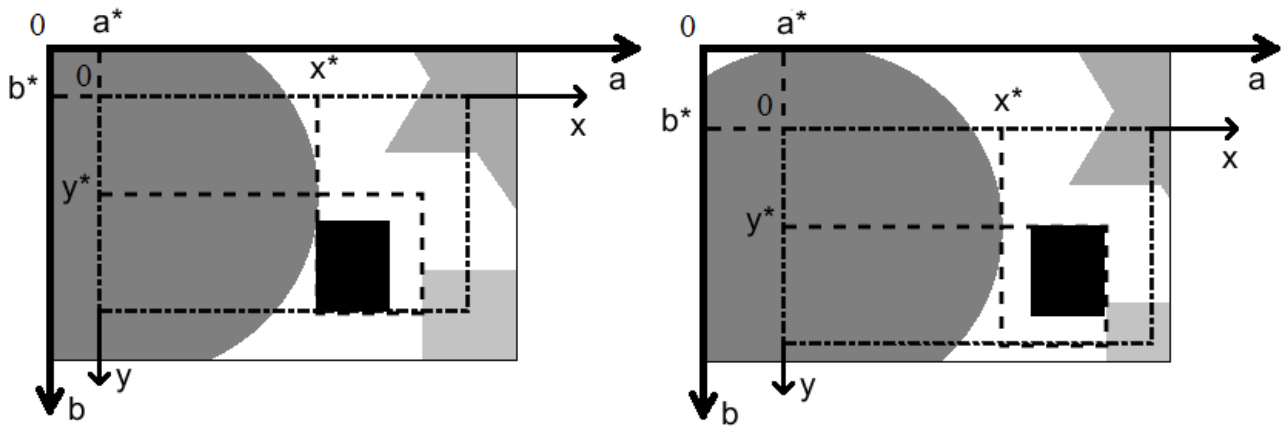


Рис. 5. Сравниваемые изображения при подвижном фоне с указанием опорного участка

В качестве эталона принимается опорный участок фона $\widetilde{W}_n$, представляющий собой часть изображения W_n за исключением некоторого скользящего окна L, в этом случае критериальную функцию для применяемого метода сопоставления изображения можно переписать в виде следующего выражения:

$$\widetilde{F}(a',b',x',y') = \sum_{(i,j)\in\widetilde{W}_n} \left(\widetilde{W}_n(i,j) - G_{n+1}(i+a', j+b')\right)^2 , \qquad (3)$$

где $\widetilde{F}(a',b',x',y')$ – значение критериальной функции для позиции (a, b) совмещения опорного фонового изображения W и некоторого участка кадра G_{n+1} при условии отбрасывания окна с координатами (x', y'); $\widetilde{W}_n(i,j)$ – яркость точки (i, j) области $\widetilde{W}_n$ изображения G_n.

Для критериальной функции вида (3) находится минимальное значение $\widetilde{F}^*(a^*,b^*,x^*,y^*)$. Координаты (a^*, b^*) принимаются в качестве искомых координат опорного участка фона $\widetilde{W}_{n+1}$ на $(n+1)$-м изображении, а координаты (x^*, y^*) – в качестве координат окна L, указывающего область положения искомого движущегося объекта. На рисунке 6 представлено пояснение к процессу поиска опорного участка изображения.

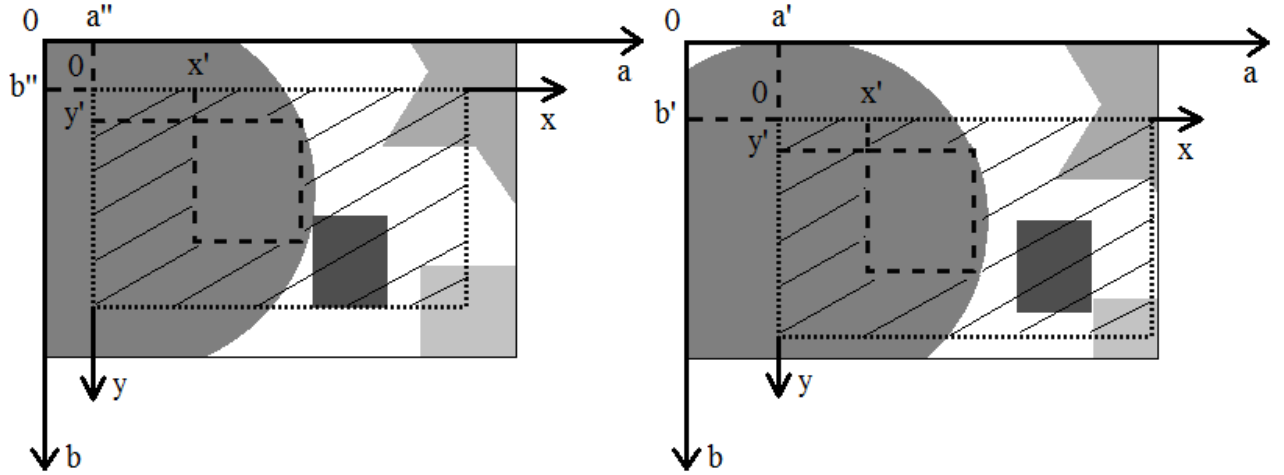


Рис. 6. Пояснение к процессу поиска опорного участка изображения

Область изображения слева (рис. 6), указанная пунктирной линией, соответствует W_n и имеет фиксированные координаты (a'', b''). Заштрихованная часть этой области представляет собой эталон $\widetilde{W}_n$. Участок внутри W_n, обведенный штриховой линией, является окном L, которое исключается из рассмотрения при совмещении анализируемых кадров. На изображении справа (рис. 6) заштрихован участок $(n+1)$-го изображения, сравниваемый с эталоном, причем, (a', b') – координаты этого участка. В процессе поиска опорный (центральный) участок из n-го изображения сравнивается с каждой совпадающей с ним по размерам областью

(n+1)-го изображения, то есть меняются координаты (a', b') При каждом сопоставлении перебираются все возможные положения окна L, то есть изменяются координаты (x', y'), причем, (x', y') совпадают для опорного участка $\widetilde{W}_n$ и для анализируемой области изображения G_{n+1}.

В ходе работы были проведены экспериментальные исследования, которые подтвердили работоспособность предлагаемого алгоритма и возможность его использования для определения местоположения движущегося объекта на подвижном фоне. Данный алгоритм может быть применен в самых различных областях, например: для сжатия видеофайлов, при стабилизации изображения во время фото- или видеосъемки, в различного рода охранных системах, в системах обнаружения и наблюдения за движущимися объектами в условиях подвижного фона и для решения ряда других задач в различных областях науки и техники.

Библиографический список

1. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс ; пер с англ. Л. И. Рубанова, П. А. Чочиа ; науч. ред. пер. П. А. Чочиа – Изд. 3-е, испр. и доп. – Москва : Техносфера, 2012. – 1104 с. : ил. – (Мир цифровой обработки).
2. Обработка изображений и управление в системах автоматического сопровождения объектов : учеб. пособие / Б. А. Алпатов [и др.]. – Рязань : РГРТУ, 2011. – 235 с. : ил.
3. Сюй Л. Исследование методов и алгоритмов обнаружения движущихся объектов в видеопотоке [Электронный ресурс] / Сюй Лэй // Молодежный научно-технический вестник. – 2013. – № 5. URL. http://sntbul.bmstu.ru/doc/568760.html

УДК 004.421; ГРНТИ 50.53.17

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА БАЗЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ИХ СРАВНЕНИЕ

Е.А. Жданкина, В.С. Решетова, Е.А. Софьин
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, aaa_rrr@mail.ru

Аннотация. Реализованы алгоритмы сжатия изображений на базе вейвлет-преобразования. Произведено тестирование и сравнение вейвлетов Хаара и Добеши.

Ключевые слова: сжатие, сжатие изображений, вейвлет, вейвлет Хаара, вейвлет Добеши

IMPLEMENTATION OF THE IMAGE COMPRESSION ALGORITHM BASED ON WAVELET TRANSFORMATION AND THEIR COMPARISON

E. A. Zhdankina, V. S. Reshetova, E. A. Sofjin
Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, Russia, aaa_rrr@mail.ru

Abstract. This paper deals with the implementation of the image compression algorithm based on wavelet transformation and their comparison.

Keywords: compression, image compression, wavelet, Haar wavelet, Daubechies wavelet

1. Введение

Проблема сжатия изображений привлекает внимание специалистов при решении широкого спектра прикладных задач. На сегодняшний день известно множество алгоритмов, основанных на вейвлет-преобразовании. Наиболее известные – JPEG 2000, DjVu. Существуют также алгоритмы специализированного применения кодирования изображений и видеопоследовательностей, основанных на вейвлет-компрессии.

Вейвлеты – это обобщенное название семейств математических функций определенной формы, которые локальны во времени и по частоте, и в которых все функции получаются из одной базовой (порождающей) посредством ее сдвигов и растяжений по оси времени. Как правило, вейвлет-преобразования (WT) подразделяют на дискретное (DWT) и непрерывное (CWT). Набор вейвлетов может приближать сложный сигнал или изображение точно или с некоторой погрешностью.

Вейвлеты занимают промежуточное место между синусоидами, которые используются при преобразовании Фурье (они хорошо локализованы в частотной области и не локали-

зованы во временной области), и импульсной базисной функцией, которая четко локализована по времени, но не несет информации о частоте сигнала. Базисными функциями вейвлетов могут быть различные функции, в том числе напоминающие модулированные импульсами синусоиды, функции со скачками уровня и т.д. Это обеспечивает легкое представление сигналов с локальными скачками и разрывами наборами вейвлетов того или иного вида. Почти все вейвлеты не имеют аналитического представления в виде одной формулы и описываются итерационными выражениями [1-3].

Целью данной работы является реализация, анализ и сравнение базовых алгоритмов на основе вейвлетов Хаара и Добеши.

2. Основы вейвлет-преобразования

Процесс сжатия изображения достаточно прост для понимания. Вначале к выбранному изображению применяется вейвлет-преобразование, далее из данных полученного изображения удаляются определенные коэффициенты. К оставшимся коэффициентам применяется кодирование. При необходимости сжатое изображение восстанавливается путем декодирования и применения обратного преобразования.

Вейвлет-анализ основывается на идее выделения информации, которую несут детали, и удаления тех деталей, которые малы и незначительно влияют на изображение в целом.

Вейвлет-преобразование сигнала можно рассматривать как представление сигнала в виде суперпозиции некоторых базисных функций – волновых пакетов, особенность которых заключается в том, что все они получены из одной прототипной волны путем растяжения (или сжатия) и смещения. Прототипная волна может быть рассмотрена в качестве импульсной реакции базового фильтра. В этом случае вейвлет-преобразование сведется к совокупности процессов фильтрации и децимации (рис. 1).

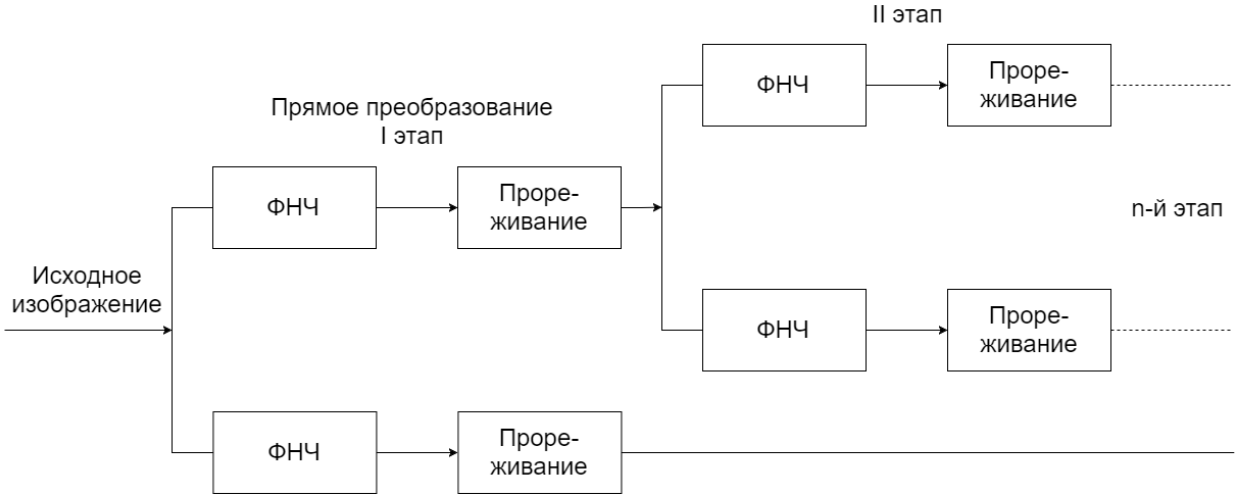


Рис. 1. Схема дискретного вейвлет-преобразования

Для фильтрации преобразуемого сигнала используются фильтры нижних и верхних частот, которые разделяют диапазон частот исходного сигнала на две части. Полученные компоненты сигнала имеют в 2 раза более узкую полосу частотных составляющих. Поэтому, в соответствие с теоремой Котельникова, их можно дискритизировать с частотой, равной половине частоты дискретизации входного сигнала, и сжать. После низкочастотных и высокочастотных фильтров каждый второй отсчет может быть просто исключен, что означает децимацию и прореживание.

На втором этапе преобразования низкочастотная компонента вновь разделяется на низкочастотную и высокочастотную составляющие с помощью аналогичных фильтров. После прореживания возможно повторение этой процедуры.

Количество вейвлетов, которые используются при разложении сигнала, определяет уровень декомпозиции сигнала. В качестве нулевого принимают сам сигнал, а уровни декомпозиции образуют ниспадающее вейвлет-дерево. Точность представления сигнала падает по мере перехода на более низкие уровни декомпозиции, однако появляется возможность

применения вейвлет-фильтрации сигналов шумов и эффективной компрессии.

При прямом преобразовании происходит разложение произвольного входного сигнала на новый базис в виде совокупности волновых пакетов – вейвлетов [1,2].

3. Непрерывное вейвлет-преобразование

Как правило, в основе вейвлет-преобразований лежит использование двух непрерывных, взаимозависимых и интегрируемых по независимой переменной функций: вейвлет-функции $\psi(t)$ и масштабирующей функции $\varphi(t)$.

Вейвлет-функции $\psi(t)$ имеет нулевое значение интеграла $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t)dt = 0$.

С помощью данной функцией, которую часто и называют вейвлетом, выделяются локальные особенности сигнала. В роли вейвлетов обычно выступают функции, которые хорошо локализованны и во временной, и в частотной области. Она по-рождает детализирующие коэффициенты:

$$d_{j-1} = \int s(t)\overline{\psi}_{j-1}(t)dt.$$

Масштабирующая функция $\varphi(t)$, как временная скейлинг-функция с единичным значением интеграла $\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t)dt = 1$, которой выполняется грубое приближение (аппроксимация) сигнала. Она порождает коэффициенты аппроксимации:

$$a_{j-1} = \int s(t)\overline{\psi}_{j-1}(t)dt.$$

$\varphi(t)$-функции присущи не всем, а, как правило, только ортогональным вейвлетам. Они требуются для преобразования нецентрированных и достаточно протяженных сигналов при раздельном анализе составляющих с низкими и высокими частотами.

4. Вейвлет Хаара

Один из самых известных ортогональных вейвлетов – вейвлет Хаара (Haar). Его порождающая скейлинг-функция задается следующим выражением:

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1, 0 < t < 1 \\ 0, t < 0, t > 1 \end{cases},$$

$\psi(t)$-функция принимает вид прямоугольных импульсов меандра:

$$\psi(t) = \begin{cases} 1, 0 < t < 0.5 \\ -1, 0.5 < t < 1 \end{cases}.$$

Вейвлеты Хаара хорошо локализованы в пространстве, но не очень хорошо локализованы в частотной области. Это связано с тем, что меандр имеет широкий спектр частот.

Рассмотрим преобразование Хаара в общем виде для одномерного сигнала. Предположим, что имеется одномерный дискретный сигнал s. Каждой паре элементов с индексами $2j$ и $2j+1$, $j \in Z$, поставим в соответствие 2 значения:

$$a_j = \frac{s_{2j} + s_{2j+1}}{2}, \qquad d_j = \frac{s_{2j} - s_{2j+1}}{2}.$$

К сигналу a_j можно применить аналогичную операцию и также получить два сигнала, один из которых является грубой версией a_j, а другой содержит детализирующую информацию, необходимую для восстановления a_j.

Обратное преобразование Хаара выглядит следующим образом:

$$s_{2j} = \alpha_j + d_j, \qquad s_{2j+1} = \alpha_j - d_j.$$

Рассмотрим двумерный сигнал. Применим к каждой строчке матрицы один шаг одномерного вейвлет-преобразования. Получим две матрицы, строки которых содержат аппроксимированную и детализирующую составляющие строк исходной матрицы. К каждому

столбцу полученных матриц также применим шаг одномерного преобразования. Получим четыре матрицы. Первая является аппроксимирующей составляющей исходного сигнала, остальные три содержат детализирующую информацию. Шаг двумерного преобразования свелся к композиции одномерных преобразований.

Рис. 2. Изображение, к которому применено прямое вейвлет-преобразование Хаара

Заметим, что для полной реконструкции сигнала могут быть применены только ортогональные вейвлеты, а вейвлет Хаара обладает «негладкостью». Рассмотрим вейвлеты Добеши, которые обладают свойствами ортогональности, среднее значение функции равно нулю, и функция быстро убывает на бесконечности и пересекают ось абсцисс $n+1$ раз. При этом n называют порядком вейвлета.

5. Вейвлет Добеши

Вейвлеты Добеши не имеют аналитического выражения и определяются только фильтрами. Скейлинг-функции и вейвлеты Добеши – это непрерывные функции, которые не тождественны нулю и недифференцируемы на конечном отрезке.

Вид скейлинг-функции и вейвлета Добеши вычисляются при помощи метода итераций, а в практических приложениях используются только вейвлет-коэффициенты h_k и g_k без вычисления конкретной формы вейвлетов.

Область задания вейвлетов Добеши шире, чем вейвлетов Хаара, но при этом они обеспечивают при вейвлет-преобразовании большее количество малозначимых коэффициентов разложения и, при отбрасывании последних, более сильное сжатие данных [4-5].

6. Достоинства и недостатки вейвлет-преобразований

• Вейвлет-преобразования обладают всеми достоинствами преобразований Фурье.

• Вейвлет-базисы могут быть хорошо локализованными как по частоте, так и по времени. При выделении в сигналах хорошо локализованных разномасштабных процессов можно рассматривать только те масштабные уровни разложения, которые представляют интерес.

• Вейвлет-базисы, в отличие от преобразования Фурье, имеют много разнообразных базовых функций, свойства которых ориентированы на решение различных задач. Вейвлеты, основанные на базисах, могут реализоваться функциями различной гладкости.

• Недостатком вейвлетных преобразований является их относительная сложность.

7. Реализация и результаты

Были реализованы два алгоритма вейвлет-преобразований: простейший вейвлета Хаара, а также биортогональный вейвлет Коэна-Добеши-Фово. Среда разработки – Spider 3.0.0 , язык программирования Phiton 3.5.2. Использовались библиотеки PIL (Python Imaging Library), Numpy, Mathplotlib, Math.

Для тестирования работы программ проводилось преобразование изображения размером 512 x 512 px в градациях серого.

Во всех опытах исходное изображение подвергалось прямому преобразованию, после чего обнулялись значения пикселей, которые оказались меньше заданного порога. После чего промежуточный вариант сжимался при помощи архиватора 7zip. Далее промежуточное изображение подвергалось обратному преобразованию (восстанавливалось).

Для оценки степени достоверности восстановления изображения использован критерий отношения пикового значения сигнала к шуму (*PSNR* – peak signal-to-noise-raito):

$$PSNR = -10 \log_{10}\left(\frac{MSE}{S^2}\right),$$

где *MSE* – среднеквадратичная ошибка (mean square error), равная сумме квадратов разностей между оригиналом и восстановленным изображением, а *S* – максимальное значение пикселя:

$$MSE = \frac{1}{MN}\sum_{m=0}^{M}\sum_{n=0}^{N}\left| x(m,n) - \hat{x}(m,n)\right|^2.$$

Под коэффициентом сжатия будем понимать отношение размера архива с исходным изображением к размеру архива с преобразованным изображением.

Размер архива с исходным изображением – 176 Кб. Результаты расчетов представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 - Вейвлет Коэна-Добеши-Фово

Порядок	Порог обнуления	Размер архива с преобразованным изображением, Кб	Коэффициент сжатия	*MSE*	*PSNR*
2	0	109	1,61	1.38 e-31	356.73
2	0,01	71,3	2,47	9.64 e-05	88.29
2	0,03	29,7	5,93	0.000344	82.76
2	0,04	25,4	6,929	0.00042	81.87
2	0,05	23,5	7,48	4.96 e-4	81.17
4	0	102	1,71	3.26 e-31	353,00
4	0,01	62,2	2,82	1.80 e-4	85.56
4	0,03	17,6	10	0.00095	78.35
4	0,05	10,1	17,43	1.80 e-3	75.57
8	0	129	1,36	1.09 e-30	347, 00
8	0,01	65,6	2,68	2.99 e-4	83.38
8	0,03	17,3	10,17	0.00297	73.41
8	0,05	9,23	19,06	9.07 e-3	68.55

Таблица 2 - Вейвлет Хаара

Порог обнуления	Размер архива с преобразованным изображением, Кб	Коэффициент сжатия	*MSE*	*PSNR*
0	125	1,41	8.73 e-32	310.59
0,01	125	1,41	1.14 e-5	49.44
0,05	125	1,41	1.80 e-4	37.43
0,07	125	1,41	2.23 e-4	36.52
0,3	125	1,41	1.13 e-3	29.47

8. Выводы

На основании проделанных тестов сформулированы следующие выводы:

1) Даже преобразование без обнуления значений пикселей, яркость которых ниже заданного порога, ведет к улучшению компрессии;
2) Обнуляя коэффициенты можно добиться значительного сжатия при применении последующей архивации (или иного алгоритма сжатия). Но следует отметить, что существует порог, после которого увеличение сжатия становится незначительным, в то время как качество изображения существенно ухудшается;
3) Для вейвлета Коэна-Добеши-Фово увеличение порядка ведет к повышению уровня сжатия, но сопровождается потерей качества;
4) Для вейвлета Хаара не удалось подобрать коэффициент обнуления, который бы значительно улучшал компрессию при дальнейшей архивации. Повышение коэффициента приводит к ухудшению качества, но при гораздо больших значениях, чем для вейвлета Коэна-Добеши-Фово.

Вейвет-преобразование можно применять в качестве подготовительного этапа при компрессии сигнала, при этом возникает проблема подбора коэффициента обнуления и порядка вейвлета. Кроме того, в дальнейшем целесообразно проанализировать варианты сжатия, опирающиеся на свойства проделанных преобразований.

Библиографический список

1. С. Уэлстид. Фракталы и вейвлеты для сжатия изображений в действии. Учебное пособ. – М.: Издательство «Триумф», 2003, с. 77 – 119.
2. Воробьев В. И., Грибунин В. Г., Теория и практика вейвлет-преобразований, ВУС, 2003, с. 1 – 204.
3. John Kominek, Advances in Fractal Compression for Multimedia Application, Department of Computer Science, University of Waterloo, Waterloo, Ontario.
4. Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, Digital Image Procession Third Edition.
5. Давыдов А.В. Вейвлетные преобразования сигналов. Курс лекций - Екатеринбург: УГГУ, ИГиГ, кафедра геоинформатики. – 2005.

УДК 62-526

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЫДЕЛЕНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБЪЕКТА ДЛЯ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ШАРА НА ПЛОСКОСТИ С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

Н.С. Лактюшин, А.Р. Гадельшин, В.В. Стротов

Рязанский государственный радиотехнический университет,

Россия, Рязань, laktushinnikita@rambler.ru

Аннотация. В данной работе описаны основные принципы проектирования и программные средства для создания автоматизированной системы позиционирования объекта на плоскости, приведено её краткое описание.

Ключевые слова: позиционирование объекта на плоскости, слежение за объектом,MATLAB,Simulink, ArduinoUNO.

THE METHOD FOR BALL OBJECT DETECTION AND TRACKING FOR TWO-DIMENSIONAL PLANE POSITIONING SYSTEM

N.S.Laktyushin, A.P.Gadelshin, V.V. Strotov

Ryazan State Radio engineering University,

Ryazan region, Ryazan, laktushinnikita@rambler.ru

Abstract. Thisarticle describe the basic principles of design and software tools for creating automated object positioning system on the plane and a short description of this system.

Keywords: positioning the object on the plane, object tracking, MATLAB, Simulink, Arduino UNO.

1. Введение

При проектировании систем управления, которые содержат различные исполнительные механизмы (двигатели постоянного тока, асинхронные двигатели, сервоприводы, шаговые двигатели и др.) и датчики (термометры, фотодатчики, тензодатчики и др.), в качестве регулятора, в настоящее время, удобно использовать *ArduinoUno* (см. рис. 1).

Рис. 1. ArduinoUNO

Arduino — это платформа для разработки автоматических систем управления, устройств, роботов на базе микроконтроллера. Благодаря удобству и простоте языка програм-

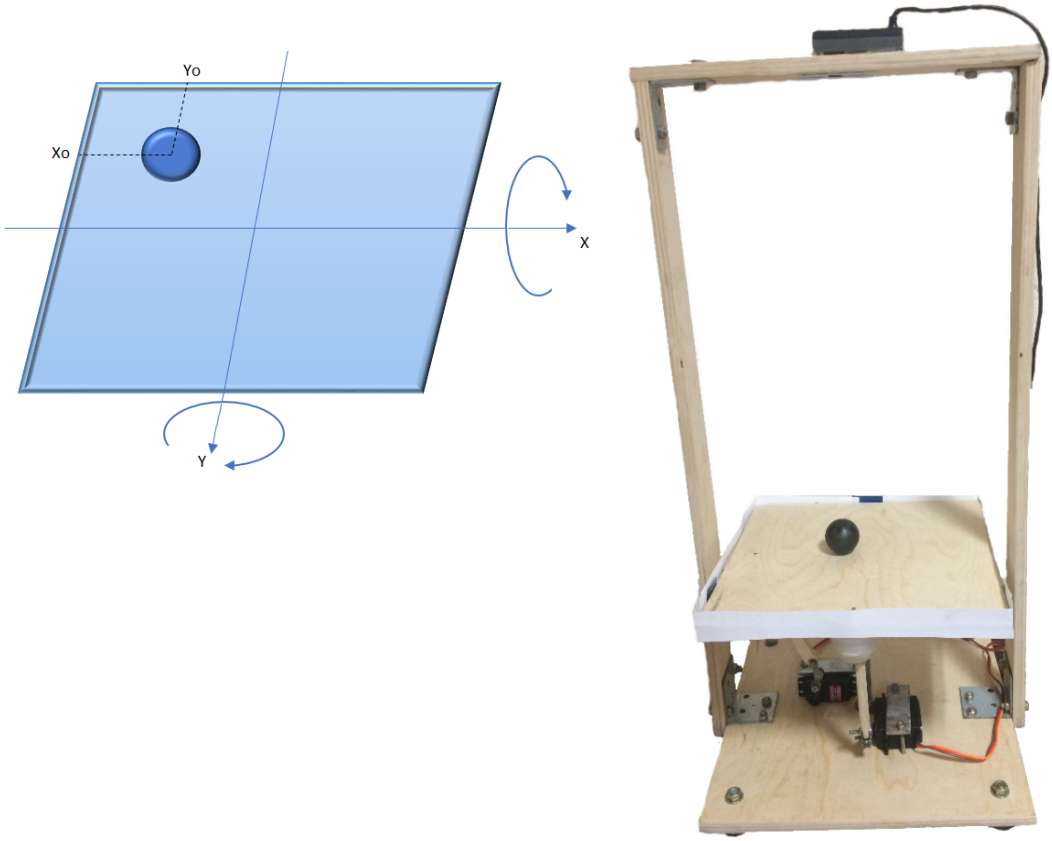
мирования, а также открытой архитектуре и программному коду, *Arduino* пользуется огромной популярностью во всем мире [1].

MATLAB — это высокоуровневый язык и интерактивная среда для программирования, численных расчетов и визуализации результатов. С помощью *MATLAB* можно анализировать данные, разрабатывать алгоритмы, создавать модели и приложения.

2. Проектирование двумерной системы управления объектом

Работа включает в себя двумерную систему позиционирования объекта на плоскости, управляемая двумя сервоприводами (см. рис. 2), в которой используются средства *MATLAB &Simulink*, платформа*Arduino UNO* на базе микроконтроллера *ATmega328p* компании Atmel и видеодатчик с диодной подцветкой.

Задача заключаетсяв оценивании координат объекта с помощью видеодатчика и средств *MATLAB&Simulink*, вычислении управляющих воздействий для выходных валов сервоприводов посредством двух ПИД-регуляторов и посылке этих управляющих воздействий на плату *ArduinoUNO*, к которой подключены сервоприводы.



а) б)

Рис. 2. Двумерная систему позиционирования объекта на плоскости
(а) –схема установки
(б) – общий вид установки

Для решения задачи необходимо задание желаемого положения объекта на плоскости (например, центр плоскости). После этого осуществляется захват кадра с веб-камеры, осуществляется поиск объекта на плоскости и оцениваются его координаты. Обработка кадра осуществляется в *MATLAB* по следующему алгоритму в цикле:

1. Захватывается кадр с видеодатчика и полученное изображение преобразуется в серое.
2. Осуществляется сегментация, в ходе которой объекты делятся на два класса (фон и объект).
3. Осуществляется разметка и параметризация.
4. Находятсякоординатыобъекта.
5. Оцениваются ошибки отклонения текущего положения объекта от желаемого.

6. Формируются управляющие воздействия для двух сервоприводов, которые отвечают за поворот платформы.
7. Отправляется посылка управляющих команд на плату *ArduinoUNO*.

Модель, работающая в *Simulink* показана на рисунке 3. Скорость передачи данных составляет 115200 бод.

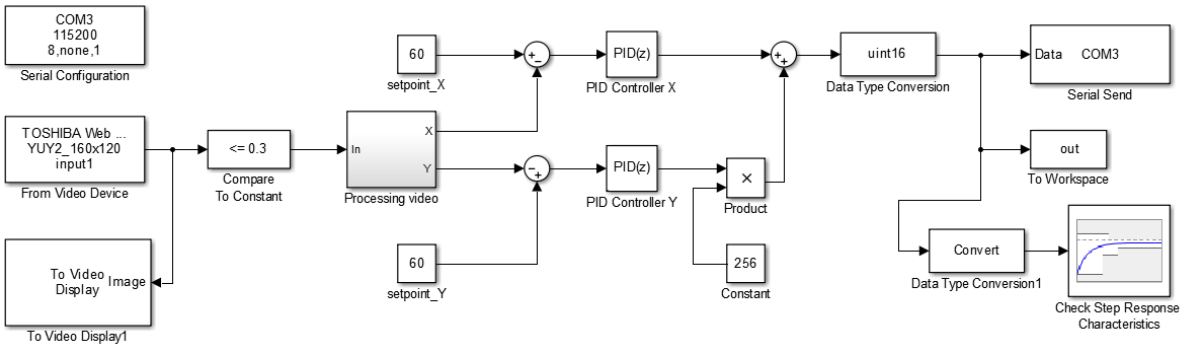


Рис. 3. Модель Simulink, работающая на ПК

Настройка параметров ПИД-регуляторов осуществляется в процессе работы системы с помощью пакета расширения *SimulinkOptimizationToolbox*, в который входит блок *CheckStepResponseCharacteristics*.

Захват кадров с видеодатчика осуществляется с помощью блока *FromVideoDevice* из пакета расширения *SimulinkImageAcquisitionToolbox*. Посылка управляющих воздействий передаётся двумя байтами. Первый байт – угол поворота первого серводвигателя, а второй – второго серводвигателя.

На плату *ArduinoUNO* с помощью программы *ArduinoIDE* загружается следующий код:

```
#include <Servo.h>
Servo servo1;
Servo servo2;
byte pos[2]={ 0,0 };
void setup(){
  servo1.attach(5);
  servo2.attach(6);
Serial.begin(115200);
}
void loop(){
if (Serial.available() > 0) {
pos[0] = Serial.read(); delay(1);
pos[1] = Serial.read(); delay(1);
    servo1.write(pos[0]); delay(1);
    servo2.write(pos[1]); delay(1);
}
}
```

3. Алгоритм выделения и слежения за объектом на изображении

Так как объект представляет собой темный шар, перемещающийся по светлой поверхности (рис. 2 (б)), то для обнаружения и выделения объекта на изображении, получаемого с камеры можно использовать модифицированный метод пороговой сегментации изображения. Для этогона основе наблюдаемого изображения $l(i,j,n)$ сформируем бинарное изображение $r(i,j,n)$, единичные точки которого будут принадлежать точкам объекта, нулевые – точкам фона по следующему правилу:

$$r(i,j,n) = \begin{cases} 1, \text{если } (l(i,j,n) < T) \text{ и } ((i,j) \epsilon R) \\ 0, \text{иначе} \end{cases}$$

Как видно, к точкам объекта будут отнесены точки, находящиеся в определенной зоне R, яркость которых будет меньше заданного порога T. Пример полученного бинарного изображения приведен на рисунке 4.

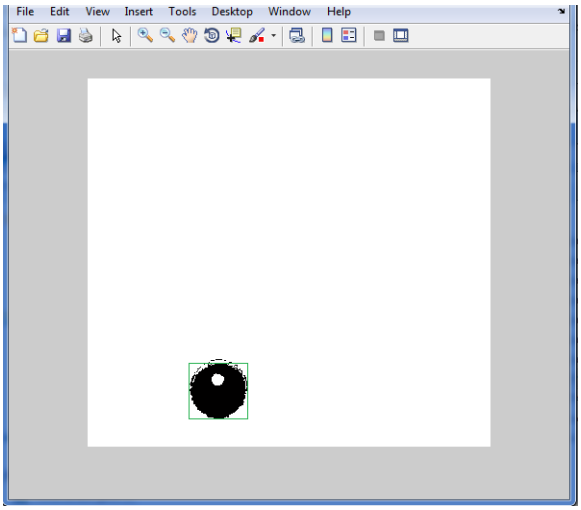


Рис. 4. Пример полученного бинарного изображения

Следующим этапом алгоритма является разметка и параметризация бинарного изображения, то есть разбиение бинарного изображения на связанные сегменты и их параметризация. Алгоритм разметки и параметризации описан в [5].

Последним этапом алгоритма является выбор сегмента, идентифицируемого с объектом. Для этого анализируются такие параметры как размеры сегмента (должны быть близкими к заданному значению), соотношение сторон сегмента (должны быть близкими к 1), отношение количество точек сегмента к количеству точек ограничивающего прямоугольника (должно быть близким к $\pi/4$). Центр масс сегмента принимается за центр объекта на изображении. Также, для уточнения положения объекта может быть использован аппарат Калмановской фильтрации [5].

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что разработанный алгоритм позволяет производить обнаружение объекта с высокой степенью надежности и определять его координаты с точностью до 1 пикселя.

4. Заключение

В работе описана двумерная система позиционирования шара на плоскости. Было разработано программное обеспечение с помощью интегрированной среды разработки *ArduinoIDE* и с использованием графической среды имитационного моделирования *Simulink* системы *MATLAB*.Предложен алгоритм выделения и слежения за шаром с помощью видеокамеры. Проведены экспериментальные исследования разработанного алгоритма.

Библиографический список

1. Arduino? [Электронный ресурс]. URL: http://arduino.ru/ (дата обращения 12.02.2017).
2. MathWorks [Электронный ресурс]. URL: http://matlab.ru/products/matlab (дата обращения 12.02.2017).
3. Запуск моделей Simulink на Arduino. [Электронный ресурс]. // Официальный дистрибьютор MathWorks на территории России и СНГ URL: http://matlab.ru/blog/MPblog/Simulink_Arduino/ (дата обращения 12.02.2017).
4. Блум Джереми. Изучаем Arduino: инструменты и методы технического волшебства: Пер. с англ. – СПб.: БХВ-Петербург, 2015. – 336 с.: ил.
5. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.

УДК 004.92; ГРНТИ 50.41.25

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ПОСТРОЕНИЯ ТРИАНГУЛЯЦИИ ДЕЛОНЕ

А.А. Теплов, К.А. Майков

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Россия, Москва

Аннотация. Приведены результаты сравнительного анализа практически востребованных методов триангуляции Делоне, обладающие высоким быстродействием и низкой ресурсоемкостью. Обосновывается выбор метода для последующей модернизации с целью построения динамических 3-D объектов в реальном времени с определенной степенью детализации. Модифицируется один из основных этапов веерного двухпроходного алгоритма триангуляции Делоне. Предложен алгоритм интервального разбиения массива точек триангуляции в соответствии с плотностью распределения, позволяющий избежать ошибок при аппаратной реализации.

Ключевые слова: виртуальная реальность, триангуляция на заданном массиве точек, триангуляция Делоне, построение динамических 3-D объектов.

THE COMPARATIVE ANALYSIS AND THE MODIFICATION OF CONSTRUCTING ALGORITHMS OF THE DELAUNAY'S TRIANGULATION

A.A. Teplov, K.A. Maikov

Bauman MSTU,
Moscow,Russia

Abstract. The results of the comparative analysis of the virtually popular methods of the Delaunay's triangulation with high performance and low resource consumption are described in this article. The choice of the method for further modernization with the aim of building of dynamic 3-D objects in real time with a certain degree of detail is justified. One of the main stages of a fibered the two-pass algorithm of the Delaunay's triangulation is modified. There is the proposal of the algorithm for the interval partitioning of the cell array of the triangulation in accordance with the density of distribution, allowing to avoid the errors in the hardware implementation.

Keywords: virtual reality, triangulation on a given cell array, Delaunay's triangulation, building of dynamic 3-D objects.

Одним из этапов определяющих ресурсоемкость построения динамических 3-D объектов с заданной степенью детализации, является триангуляция [4,5]. На практике возникает необходимость определения прототипа метода триангуляции, удовлетворяющего требованию высокого быстродействия и низкой ресурсоемкости с последующей модификацией для конкретного класса задач.Ряд практических задач характеризуются необходимостью моделирования 3-D объектов, описанных соответствующим набором точек с неизвестным законом распределения. В этом случае необходимо произвести триангуляцию на исходном наборе точек, обеспечивающую наибольшую «степень правильности» [1] треугольников.Проблема «степени правильности» треугольников решается триангуляцией, удовлетворяющей условию Делоне [3].

Известные алгоритмы триангуляции Делоне можно разделить на следующие четыре категории [1]:

- итеративные алгоритмы;
- алгоритмы слиянием;
- двухпроходные алгоритмы;
- пошаговые.

В итеративных алгоритмах реализуется последовательное добавление точек в частично построенную триангуляцию Делоне [2] путем их локализации. Проводятся локальные проверки вновь полученных треугольников на соответствие условию Делоне, с последующим перестроением. Трудоемкость итеративных алгоритмов Делоне определяется как$O(N^2)$[1], а для случая равномерного распределения точек – $O(N)$[1]. Недостатками итеративных алгоритмов Делоне является большое число итеративных циклов, зависимость алгоритма сортировки от структуры исходных данных, а также необходимость проверки на условие Делоне.

Алгоритмы слиянияреализуют разбиение исходного множества точек на несколько подмножеств и построение триангуляций на этих подмножествах с последующим объединением нескольких триангуляций [1]. Трудоёмкость алгоритмов слиянием составляет в сред-

нем$O(N)$[1]. Алгоритмам слиянием свойственна избыточность, определяемая необходимостью построения выпуклых областей для узких полос, а, следовательно, формированием длинных, узких треугольников, перестраиваемых при слиянии. Алгоритмы слиянием обладают высоким быстродействием, что обуславливает их практическую преимущественность.

Преимущественная особенность двухпроходных алгоритмов состоит в том, что на первом цикле строится некоторая триангуляция, игнорируя выполнение условия Делоне, которая на втором цикле модифицируется с учетом удовлетворения условию Делоне [1].Трудоёмкость двухпроходных алгоритмов составляет в среднем$\boldsymbol{O(N)}$[1], а в худшем случае –$\boldsymbol{O(N^2)}$ [1]. Данный алгоритм характеризуется высоким быстродействием, т.к. очередной треугольник, попадающий в триангуляцию, не подвергается проверке на удовлетворение условию Делоне.

Алгоритмы пошагового построения реализуют лишь треугольники, удовлетворяющие условию Делоне в конечной триангуляции, а поэтому не требующие перестроения [1].Трудоёмкость данных алгоритмов в среднем составляет $\boldsymbol{O(N)}$, а в худшем случае – $\boldsymbol{O(N^2)}$.

Практические особенности задачи построения динамических 3-D объектов в реальном времени определяют такие требования к алгоритмам триангуляции Делоне, как высокое быстродействие и низкая ресурсоемкость. Рассмотренные алгоритмы не удовлетворяют этим требованиям. Поэтому возникает необходимость построения алгоритма, который не зависит от разбиения области триангуляции на примитивы, содержащие точки самой триангуляции и не требует проверки условия Делоне на каждой итерации добавления текущего треугольника в исходную триангуляцию. Двухпроходные алгоритмы триангуляции Делоне удовлетворяют указанным критериям, однако нуждаются в модификации с целью повышения быстродействия. В качестве модифицируемого алгоритма был выбран двухпроходной веерный алгоритм [2] триангуляции. Указанный алгоритм избыточен в определении центра масс точек. Определяя координату точки центр масс по OX или OY, при большом количестве точек нецелесообразно вычислять значение среднего арифметического и при больших значениях координат точек может произойти переполнение данных, что повлечет за собой ошибку или сбой программы. Поэтому целесообразно все значения точек триангуляции разделить на интервалы по оси X на $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$ ... Δx_n и по оси Y на $\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y$ ... Δy_n. Так же необходимо определить количество точек, принадлежащее соответствующим интервалам по осям X и Y. Результирующие формулы, получения центра масс точек имеет следующий вид:
для координаты X_c

$$X_c = \frac{n_1 \cdot \Delta x_1 + n_2 \cdot \Delta x_2 + \ldots + n_k \cdot \Delta x_k}{X_{max} - X_{min}}, \quad (1)$$

где X_c – x-координата точки центра масс, n_i – количество точек на i-м интервале, Δx_i –i-ый интервал на оси X, X_{max} – максимальное значение по оси X среди всех точек триангуляции, X_{min} – минимальное значение по оси X среди всех точек триангуляции.

Формула вычисления координаты Y_c имеет аналогичную структуру. Последующие этапы триангуляции реализуются согласно стандартным этапам [2] построения веерного алгоритма. Разработанная схема модифицированного веерного алгоритма представлена на рисунке 1.

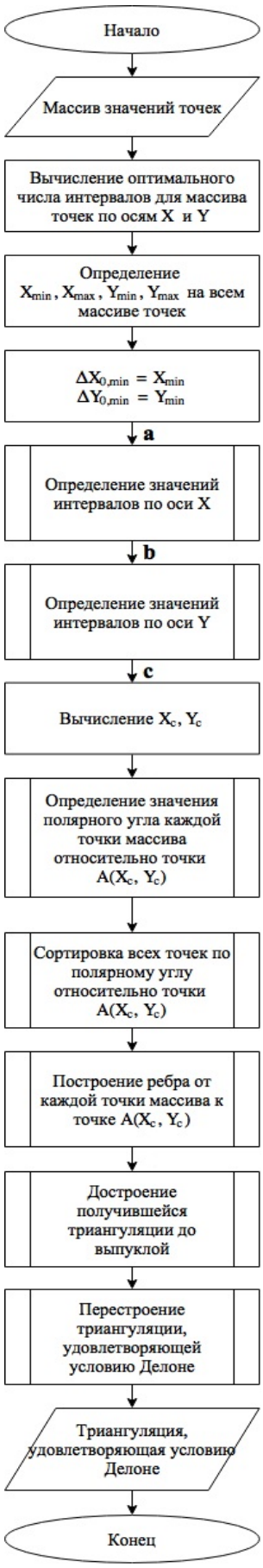


Рис. 1. Схема модифицированного веерного алгоритма

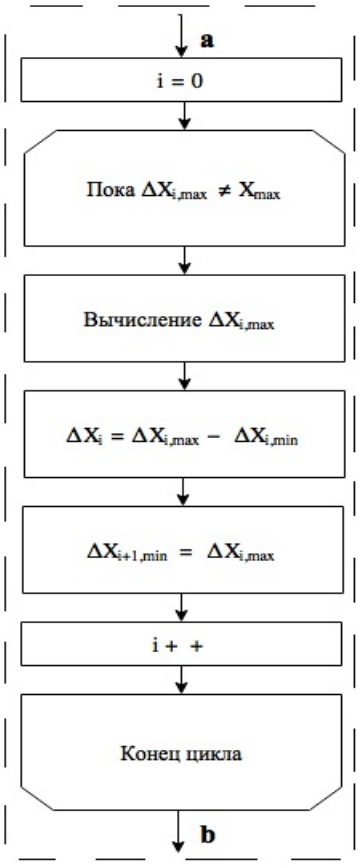


Рис. 2. Схема определения значений интервалов по оси X

Схема определения значений интервалов по оси Y имеет аналогичную структуру.

На этапе определения числа интервалов для массива точек по осям X и Y практически важным является выбор критерия оценки оптимальности количества разбиений отрезка на интервалы. В качестве критерия можно применить критерии Хи-квадрат [6], Стьюдента [6] и т.д., что определяется спецификой конкретной задачи визуализации.

В результате проведенного сравнительного анализа практически востребованных алгоритмов триангуляции Делоне, показано, что рассмотренныеалгоритмы не удовлетворяют требованиям построения динамических 3-D объектов с заранее определенной степенью детализации, а, следовательно, нуждаются в модификации. Предложена модификация веерного двухпроходного алгоритма триангуляции Делоне, функциональной особенностью которого является вычисление значений центра масс массива точек триангуляции посредством разбиения массива точек на подмножества по оси X и Y. Указанные вычисления позволяют существенно выиграть в производительности на большом массиве точек при определении координат точки центра масс и избежать переполнения данных, а, следовательно, ошибки или сбоя программной реализации.

Библиографический список

1. Скворцов А.В., Мирза Н.С. Алгоритмы построения и анализа триангуляции. – Томск: Изд-во Томского университета, 2006. – 168 с.
2. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и её применение. — Томск: Изд-во Томского университета, 2002. — 128 с.
3. Шайдуров В.В. Многосеточные методы конечных элементов. – Москва: Наука, 1989. – 288 с.
4. Костюк Ю.Л., Фукс А.Л. Визуально гладкая аппроксимация однозначной поверхности, заданной нерегулярным набором точек. — Томск: Изд-во Томского университета, 2000. — С.41-45.
5. Скворцов А.В. Построение триангуляции Делоне за линейное время. – Томск: Изд-во Томского университета, 1999. – С.120-126.

УДК 004.931; ГРНТИ 81.83.21

ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛИНИИ ЛОГИСТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ФГУП «ПОЧТА РОССИИ»

А.В. Фадкин, Ю.Н. Каревская
Воронежский государственный технический университет
Воронеж, Россия, kim0005@yandex.ru

Аннотация. Решается задача разработки автоматизированной системы управления конвейерной линией участка SPS «ФГУП Почта России Логистический центр». Система должна обеспечивать плавную работу конвейерного оборудования без толчков для предотвращения падений пакетов и образования заторов, соответствовать всем нормам и правилам безопасности. Весь комплекс оборудования должен быть рассчитан на возможность круглосуточной и круглогодичной эксплуатации. Приведена технологическая схема процесса и перечень элементов.

Ключевые слова: сортировщик, техническое зрение, технологическая схема

THE INTEGRATION OF VISION SYSTEMS FOR AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF THE CONVEYOR LINE LOGISTICS CENTER OF RUSSIAN POST

A.V. Fadkin, Y.N. Karevskaya
Voronezh State Technical University
Voronezh, Russia, kim0005@yandex.ru

Annotation. The problem of the development of an automated conveyor line control system Lot SPS «FSUE Russian Post logistics center." Annotation. The problem of the development of an automated conveyor line control system Lot SPS «FSUE Russian Post logistics center." Full range of equipment must be designed for the possibility of the clock and year-round operation. The technological scheme of the process and a list of elements.

Keywords: sorter, machine vision, technological scheme.

Большую часть информации об окружающем нас мире человек получает через зрительный канал и обрабатываем полученную информацию при помощи аппарата анализа и интерпретации визуальной информации. Соответственно возникает вопрос о возможной реализации данного процесса машиной.

В рамках постоянно развивающихся технологий и усложнения производственно-технических задач, визуальный анализ и автоматическая обработка информации становятся всё более актуальным вопросом. Применение машинного зрения очень эффективно и актуально в следующих сферах: таких как автоматизация процессов, повышение производительности, повышение качества выпускаемых изделий, контроль производственного оборудования, интеллектуальные робототехнические комплексы, системы управления движущимися аппаратами, биомедицинские исследования и множество других[3]. С помощью высокотехнологичного оборудования за несколько секунд можно проверить качество каждой единицы продукции, подсчитать количество товаров на конвейере, определить их вес и размеры с точностью до нескольких микрон. **Видеокамеры технического зрения** также нашли применение в системах видеонаблюдения. С их помощью можно учесть количество людей на объекте, проанализировать их перемещения.

Система технического зрения обычно включает: скоростные видеокамеры, чувствительные датчики, специальную подсветку, контроллер — компьютер с требуемым ПО, устройства для синхронизации работы элементов.

Влияние человеческого фактора на систему сведено к минимуму. После установки и настройки компоненты работают в соответствии с заданным алгоритмом. Контроллер с рабочими элементами соединяется кабелями длиной до 100 метров. Благодаря этому, его можно установить вне зоны производства, защитить от несанкционированного доступа.

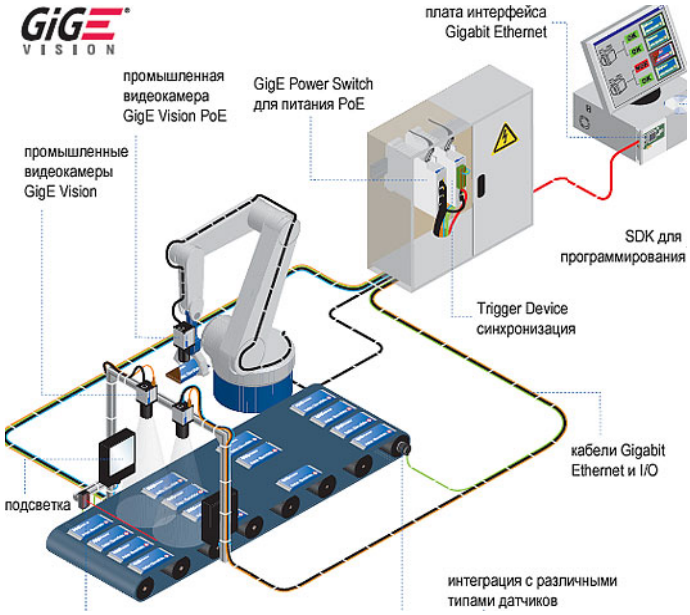


Рис.1. Типовая схема системы машинного зрения

В целом, в задачи систем машинного зрения входит получение цифрового изображения, обработка изображения с целью выделения значимой информации на изображении и математический анализ полученных данных для решения поставленных задач. Используем же эти свойства для решения данной задачи, т.е. идентификация и инспекция посылок на конвейерной ленте сортировщика SPS [2].

В задачах идентификации основное назначение видеокамеры - считывание различных кодов (штрих-кодов, 2D-кодов и т. п.) с целью их распознавания средствами камеры или системным контроллером, а также определение различных буквенно-цифровых обозначений. Кроме того к задачам данной группы можно отнести системы, выполняющие задачи безопасности, такие как идентификация личности и техники, детекторы движения.

В приложениях, связанных с инспекцией, цель машинного зрения - подтвердить определенные свойства, например, наличие или отсутствие этикетки на бутылке, болтов для проведения операции сборки, шоколадных конфет в коробке или наличие различных дефектов[4].

Работа операторов на постах конвейерной линии предполагает сосредоточенность и внимательность на протяжении всей рабочей смены. Человеку тяжело сохранять высокую трудоспособность долгое время, потому как он начинает уставать, быть невнимательным и ошибается. Поэтому было принято решение заменить 2 операторов конвейерной линии на систему технического зрения фирмы Omron.

Был реализован проект по разработке станции управления сортировщиком с использованием технического зрения и подобранного по параметрам оборудования.

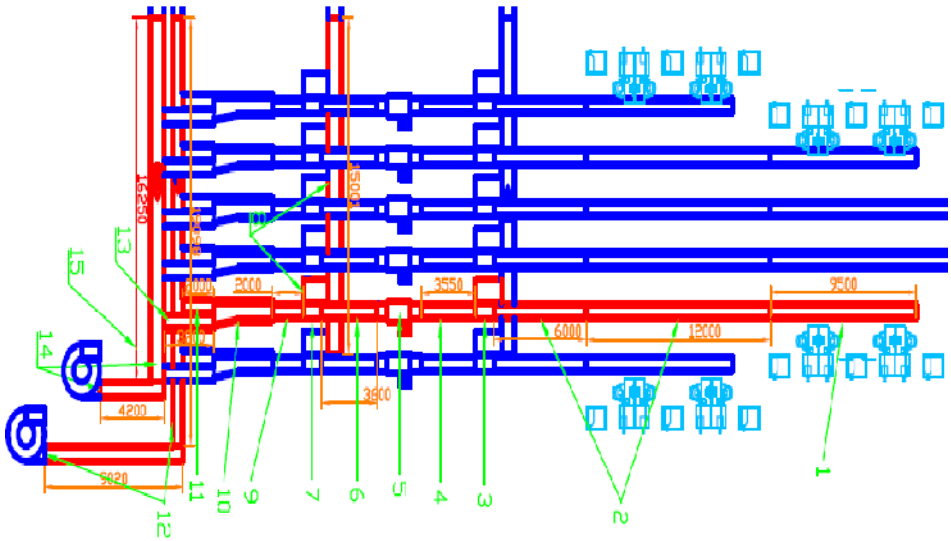


Рис. 2. Технологическая схема участка SPS

Синим цветом показаны все линии, красным – необходимая линия на данном этапе.

Скорость конвейера 0,2 м/с. Лента конвейера размечена для корректного положения посылки. Оператор заносит информацию о штрих-коде в базу и кладет посылку на ленту конвейера. При неисправности этого конвейера должно пройти необходимое время для прохождения всех уже находящихся на последующих конвейерах посылок и, если неисправность не устранена, линия останавливается. Посылка должна пройти не менее 30 сек от последнего места оператора до камеры, сканирующей штрих-код, находящейся в конце этого конвейера. Сигнал на считывание штрих-кода камерой мы отправляем при прохождении посылкой фотодатчика, находящегося перед камерой. Камера считывает штрих код и передает нам в цифровом виде.

Управление технологическим оборудованием возможно, как в местном режиме от кнопочных постов местного управления (ПМУ), расположенных непосредственно у технологического оборудования в начале и конце линии сортировки SPS, либо с панели оператора NB 7', производство Omron, расположенной на щите SPS-ЩСУ [1], предполагается управление в дистанционном режиме от АРМ оператора, который будет расположен в диспетчерской. Таким образом, предполагается, что работа всей линии будет реализована в автоматическом режиме на базе ПЛК. Управление осуществляется в соответствии с алгоритмами, заложенными в контроллер системы управления. В каждом щите устанавливается реле безопасности G9SE, производство Omron. К реле будут последовательно подключаться кнопки аварийного останова и трос безопасности. При нажатии аварийной кнопки или срабатывании троса безопасности реле отключит сетевой контактор и обесточит все конвейеры. Соответствующие сигналы дублируются в контроллер. Трос безопасности предполагается установить над конвейерной линией по всей длине. Все конвейеры работают через преобразователь частоты (ПЧ), производство OMRON, что позволяет задавать необходимую производительность линии.

На линии установлены два сортировщика и два ската, которые распределяют посылки в нужных направлениях. Также установлен разделитель, который осуществляет разделение посылок по габаритным размерам.

Пуск электроприводов конвейеров осуществляется через преобразователь частоты серии MX2, производство Omron. Они должны быть настроены на скорость, указанную для каждого конвейера. Изменение этой скорости возможно с помощью настроек оборудования при сервисном обслуживании. Частотные преобразователи и ПЛК, относящиеся к оборудованию, расположенному в одном здании устанавливаются в шкафах управления в этом здании.

Возникшие сложности при выборе подсветки были решены путем создания стойки. Разработана и сварена стойка с подсветкой для 2-х разно-уровневых камер Omron с объективами VS-L2526/M42-10.

Рис. 3. Стойка с камерами

Сигналы с них поступают в местный контроллер через кабель FZ-VS3 (рис. 4).

Рис. 4. Выходы контроллера FH 3050

Необходимо предусмотреть режим плавного и последовательного запуска и остановки конвейерного оборудования для исключения перегрузки сети электропитания.

Кнопки Старт/Стоп, аварийной остановки и лампа индикации устанавливаются на доступном для оператора уровне в начале и в конце линии.

Предусмотреть возможность в дальнейшем установку дополнительных ламп индикации и троса аварийной остановки вдоль линии.

Линия запускается нажатием кнопки Старт. После нажатия этой кнопки все лампы индикации линии мигают зеленым цветом в течение 5 сек. Если, не нажата кнопка Стоп или кнопка аварийной остановки (возможно в дальнейшем – также не натянут трос аварийной остановки), линия запускается, а лампы индикации загораются постоянным зеленым цветом.

Если нажата кнопка Стоп, линия останавливается, и лампы загораются постоянным синим цветом. Кнопка Стоп не должна сбрасывать очередность сортировки пакетов при последующем нажатии кнопки Старт.

Если нажата кнопка аварийной остановки, вся линия останавливается, лампы индикации загораются постоянным красным цветом и линию нельзя запустить пока не будут устранены причины аварийной остановки и не будет деактивирована кнопка аварийной остановки. Если неисправен инвертор, лампы мигают красным цветом.

Индикация работы линии осуществляется светосигнальными колоннами.

Зеленый цвет – «Работа», синий – «Стоп», желтый – «Заполнение/Отказ», красный – «Авария».

В каждом шкафу управления установлены УЗО.

Таким образом, внедрение станции управления позволяет автоматизировать конвейерную линию SPS,перенести управление сортировщиком на ПК оператора. Преимущества камер очевидны: высокая производительность, отсутствие утомляемости, болезней или невнимательности, возможность круглосуточной и круглогодичной работы и получение заданной точности повторяемых измерений. В рассматриваемом случае точность инспекции изделий достигла 98% при высокой скорости движения конвейера. Цена на машинное зрение значительно упала за последнее десятилетие, поэтому в будущее десятилетие будет целесообразно внедрять эти системы в промышленно – производственные процессы.

Библиографический список

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) 7-ое издание 2003-14с.

2. Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, А.В. Бондаренко, М.В. Ососков, А.В. Моржин. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.

3.**[Бобровский, 2004]** Бобровский С. «Когда машины прозреют» - URL : pcweek/themes/detail.php?ID=66663&sphrase_id=12198

4. **[Зуева, 2008]** Зуева Е.Ю. «Компьютерное зрение в ИПМ им. В.М. Келдыша РАН – история развития» - URL : keldysh/papers/2009/art04/Zueva_09.htm

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

С.А. Зенин

Рязанский государственный радиотехнический университет

Российская Федерация, г. Рязань, zeninser@outlook.com

Аннотация. В докладе рассмотрен алгоритм оценки параметров геометрических преобразований изображений: поворота и смещения. Благодаря переходу в спектральную область удалось обеспечить высокое быстродействие работы алгоритма, достаточное для его применения в системах обработки изображений реального масштаба времени.

Ключевые слова: изображение, геометрические преобразования, фазовая корреляция, преобразование Фурье

Annotation. In this paper the image registration algorithm is presented which is oriented to estimation of mutual shift and rotation of the two images. Transformation of the images from time domain to frequency domain provides high performance of computation and allows to use the algorithm in the realtime machine vision applications.

Keywords: image, geometrical transform, phase correlation, Fourier transform.

1. Введение

Геометрические преобразования изображения – это изменения положений точек изображения в пространстве, следствием которого является искаженное представление (сдвиг, поворот, изменение размеров и пропорций) всего изображения и отдельных его объектов.

Причины возникновения геометрических преобразований связаны с перемещением объекта наблюдения, перемещением и изменением ориентации видеодатчика. Еще одной причиной возникновения геометрических преобразований является непрямолинейность рас-

пространения света, которая возникает из-за присутствия в атмосфере различных видов неоднородностей, например, перепадов температур.

Есть несколько подходов к оценке геометрических преобразований [1]. К ним, в частности, относится классический корреляционный алгоритм, суть которого заключается в вычислении взаимной корреляционной функции наблюдаемого изображения и эталонного. Корреляционные алгоритмы довольно емкие в плане вычислений и на практике используются в основном только для оценки сдвигов.

Альтернативой корреляционным методам являются методы оценки геометрических преобразований на основе выбора опорных элементов. Суть подобных методов заключается в поиске опорных объектов на каждом из обрабатываемых изображений, определении их координат, а затем нахождении параметров геометрических преобразований между ними. Плюсами подхода являются возможность оценки сложных многопараметрических преобразований, а также возможность работать с изображениями, снятыми в разных спектральных диапазонах. Недостатком является сложность поиска опорных элементов, а также трудности автоматического установления соответствий между ними.

Использование аппарата быстрых спектральных преобразований – это путь к снижению вычислительных затрат при реализации корреляционных алгоритмов. Помимо снижения вычислительных затрат, использование спектральных преобразований позволяет создавать алгоритмы качественно иного типа.

В данном докладе представлен алгоритм поиска параметров сдвига и поворота изображений, приведена экспериментальная оценка работы алгоритма.

На рисунках 1-3 показано влияние геометрических преобразований на оригинальный кадр видеосюжета. Оригинальное изображение приведено на рисунке 1. На рисунках 2 и 3 показано соответственно влияние поворота и сдвигов вдоль координатных осей.

Рис.1. Оригинальное изображение

Рис.2. Изображение, повернутое на 30 градусов

Рис.3. Изображение, смещенное по вертикали и горизонтали

2. Алгоритм оценки параметров геометрических преобразований

Алгоритм оценки поворота и смещения основывается на свойствах преобразования Фурье изображений. Поворот изображения приводит к такому же повороту его спектра. Сдвиг в этом случае не оказывает влияния, поэтому оценку сдвига и поворота изображений можно производить раздельно. Разработанный алгоритм оценки поворота и смещения состоит из следующих этапов:

Исходные изображения умножается на функцию (окно) Ханнинга. Это необходимо для компенсации явления Гиббса, связанного с конечностью массива, используемого для хранения изображений. На рисунке 4 показан оригинальный кадр, умноженный на функцию Ханнинга.

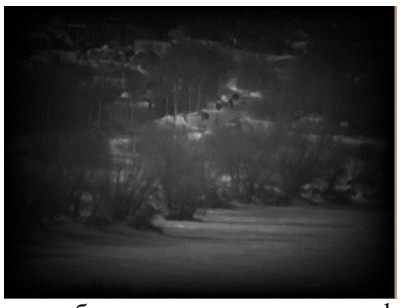


Рис.4. Оригинальное изображение, умноженное на функцию Ханнинга

Вычисляется ДПФ для полученных после первого пункта изображений. Для сравнения на рисунке 5 представлено ДПФ оригинального изображения, а на рисунке 6 – оригинального изображения, умноженного на функцию Ханнинга. В первом случае видны лишние частотные составляющие, мешающие адекватной оценке параметров геометрических преобразований. На рисунке 7 показано ДПФ повернутого на 30 градусов оригинального изображения, умноженного на функцию Ханнинга.

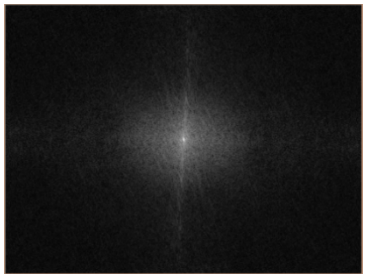


Рис. 5. ДПФ оригинального изображения

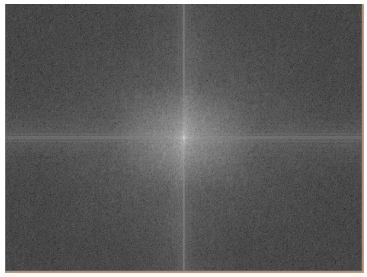


Рис. 6. ДПФ оригинального изображения после его домножения на функцию Ханнинга

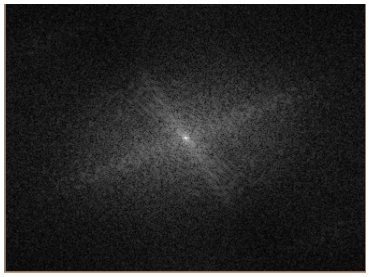


Рис.7. ДПФ изображения, повернутого на 30 градусов

Осуществляется преобразование исходного рисунка 6 и повернутого рисунка 7 изображений в полярную систему координат.

С помощью алгоритма фазовой корреляции [2] вычисляется смещение спектров исходного и повернутого изображения в полярной системе координат по оси соответствующего сдвигу. Величина сдвига с точностью до множителя, связанного с пространственным разрешением обрабатываемых изображений, определяет угол поворота между изображениями.

Выполняется компенсация поворота с учетом оценки, найденной на предыдущем шаге. Изображение после компенсации поворота также должно быть умножено на оконную функцию.

С помощью алгоритма фазовой корреляции осуществляется оценка смещения между исходным изображением и изображением, полученным после компенсации поворота. Заметим, что алгоритм фазовой корреляции обеспечивает субпиксельную оценку смещений.

3. Экспериментальные исследования

Проведенные в ходе работы экспериментальные исследования показали, что получен достаточно точный алгоритм, способный работать в реальном масштабе времени. Например, при работе с видео размером 640x480 пикселей, алгоритм может обрабатывать 15-25 кадров в секунду на обычном персональном компьютере, что является хорошим результатом.

Также были проведены испытания точности работы алгоритма, в которых изображение искажалось по заданному закону: задавались определенные значения поворота и смещения. Оценивалось отклонение параметров геометрических преобразований, вычисленных с помощью алгоритма, от заданных заранее параметров.

На рисунках 8, 9, 10 показаны зависимости ошибок оценки параметров преобразований от их истинных значений на примере одного из тестовых изображений.

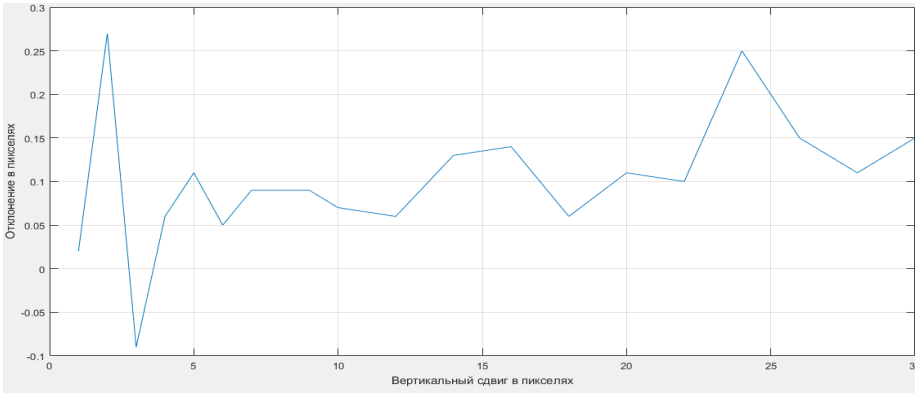


Рис. 8. График зависимости ошибки оценки вертикального сдвига

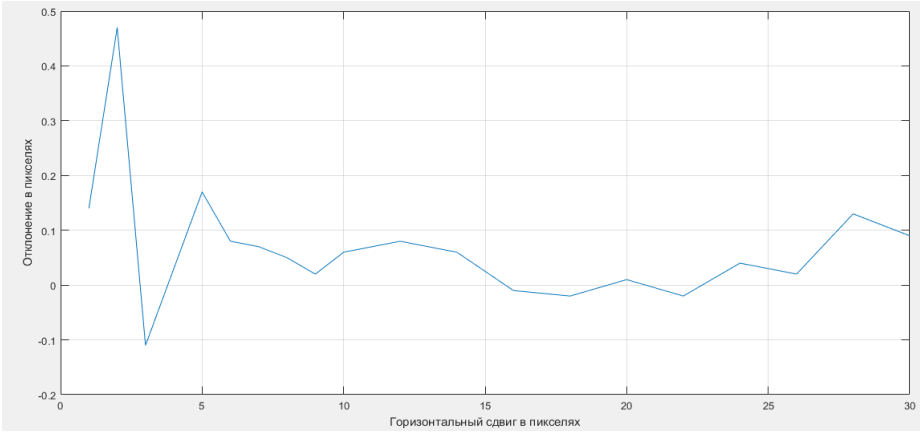


Рис. 9. График зависимости ошибки оценки горизонтального

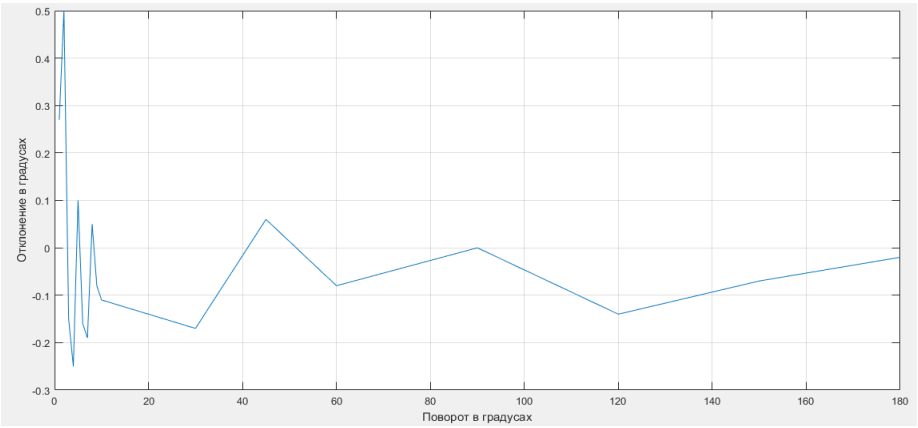


Рис. 10. График зависимости ошибки оценки угла поворота

В результате, СКО для оценки сдвигов в среднем равно $1{,}7\cdot 10^{-2}$ пикселей. СКО для оценки угла поворота составило $3{,}3\cdot 10^{-2}$ градуса.

4. Выводы

Таким образом, разработанный алгоритм оценки параметров геометрических преобразований изображений продемонстрировал хорошие точностные показатели и скорость работы, поэтому он может быть рекомендован к использованию в системах обработки видеоизображений, функционирующих в реальном масштабе времени.

Работа выполнена за счет средств гранта Президента РФ для государственной поддержки Ведущих научных школ НШ 7116.2016.8 под научным руководством А.Б. Фельдмана.

Библиографический список

1. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление, Автор: Б. А. Алпатов, П. В. Бабаян, О. Е. Балашов, А. И. Степашкин. Издательство: Радиотехника, 2008, 176 с
2. Reddy B. S., Chatterji B. N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration //IEEE transactions on image processing. – 1996. – V. 5. – №. 8. – P. 1266-1271.

СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»

УДК 621.314.57: 629.423.32; ГРНТИ 47.41.35

СХЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СИЛОВОЙ ЧАСТИ И МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ИНВЕРТОРА

М.Ю. Пустоветов
Донской государственный технический университет,
Россия, Ростов-на-Дону, mgsn2006@rambler.ru

Аннотация. Приведен краткий анализ схем полупроводниковых преобразователей, используемых для питания вспомогательных цепей электровозов постоянного тока. Предложена электрическая принципиальная схема силовой части устройства питания вспомогательных цепей электровоза постоянного тока, отличная от получивших распространение. Проведено исследование характеристик устройства в статическом режиме. Ожидается снижение стоимости комплекта силовых ключей преобразователя до 1,5 – 2,0 раз по сравнению с известными техническими решениями.

Ключевые слова: автономный инвертор напряжения, трехфазный трансформатор, электровоз постоянного тока, питание вспомогательных цепей, широтно-импульсная модуляция, гармонический состав

THE ELECTRICAL SCHEMATIC DIAGRAM OF POWER PART AND THE METHODS OF FORMING THE INVERTER OUTPUT VOLTAGE

M.Yu. Pustovetov
Don State Technical University,
Russia, Rostov-on-Don, mgsn2006@rambler.ru

Abstract. An article provides a brief analysis of the circuits of semiconductor converters used to power the auxiliary circuits of DC electric locomotive and proposes electrical schematic diagram of power part of device that is different from the widely spread. Author using computer simulation methods investigates characteristics of the device supply auxiliary circuits of DC electric locomotive in static mode. Cost reduction of the set of power switches of the inverter up to 1.5 – 2.0 times in comparison with the known technical solutions .

Keywords: autonomous voltage source inverter, three-phase transformer, DC electric locomotive, the supply of auxiliary circuits, pulse width modulation, harmonic composition

1. Введение

В настоящее время на борту магистральных электровозов весьма распространены потребители трёхфазного и однофазного переменного напряжения. Одной из задач, решаемых при разработке устройств для питания собственных нужд электровоза, является выбор способа преобразования высокого напряжения контактной сети в низкое трёхфазное переменное напряжение. Некоторые схемные решения для электровозов постоянного тока на базе двухуровневых и трехуровневых мостовых автономных инверторов напряжения (АИН), включая устройства с использованием трёхфазных трансформаторов (Т) опубликованы отечественными и зарубежными специалистами [1 - 3]. Они обладают рядом недостатков. Использование мостовой схемы двухуровневого АИН является вариантом с минимальным числом полупроводниковых ключей (6 штук) и наиболее высокой надёжностью, но требует при напряжении контактной сети 3 кВ использования транзисторов с рабочим напряжением 6,5 кВ, которые дороги (особенности формирования выходного напряжения в двухуровневом трехфазном мостовом АИН для случая, когда заземлена минусовая клемма входного источника постоянного напряжения, характерного для электрифицированного железнодорожного транспорта, рассмотрены в [4]: при открытом верхнем транзисторе фазы на выходе этой фазы АИН относительно земли возникает потенциал равный полному постоянному напряжению на входе АИН). Использование трёхуровневого мостового АИН позволяет ограничиться более дешёвыми силовыми транзисторами с величиной рабочего напряжения 3,3 кВ. При этом удваивается их количество, усложняется схема и алгоритмы управления АИН. Целью настоящей работы является предложить вариант устройства питания вспомогательных цепей электровоза постоянного тока с трёхфазным Т и АИН, позволяющий использовать минимальное количество относительно низковольтных силовых транзисторов при простой схеме соединения.

2. Схема электрическая принципиальная силовой части устройства

Ввиду лучших массогабаритных показателей, целесообразно использовать не трёхфазную группу однофазных Т, а Т с единым магнитопроводом, например трехстержневым. Предлагаемая к использованию схема АИН предполагает независимое (без электрических соединений друг с другом, по открытой схеме) подключение фаз первичной обмотки Т (рис. 1).

Устройство на рисунке 1 преобразует постоянное напряжение контактной сети в трёхфазное переменное напряжение, частота и величина которого может регулироваться. Каждая фаза первичной обмотки трёхфазного Т подключена к ячейке преобразователя, представляющей собой однофазный полумостовой АИН. Например, фаза *A* подключена к ячейке, включающей в себя транзисторные ключи *VT*1 и *VT*2, диоды *VD*1 и *VD*2, конденсаторы *C*1 и *C*2. Транзисторы *VT*1 и *VT*2 открываются поочерёдно на равные промежутки времени, формируя переменное напряжение на фазе *A* первичной обмотки Т. Последовательно соединённые конденсаторы *C*7, *C*8 и *C*9 представляют собой ёмкостный делитель, разделяющий входное постоянное напряжение контактной сети U_d на три равные части (по количеству фаз Т и ячеек преобразователя). Пары транзисторов в остальных двух фазах работают так же, как и в фазе *A*, но со сдвигом во времени на 120° эл. и 240° эл., образуя на обмотках Т трёхфазную симметричную систему питающих напряжений.

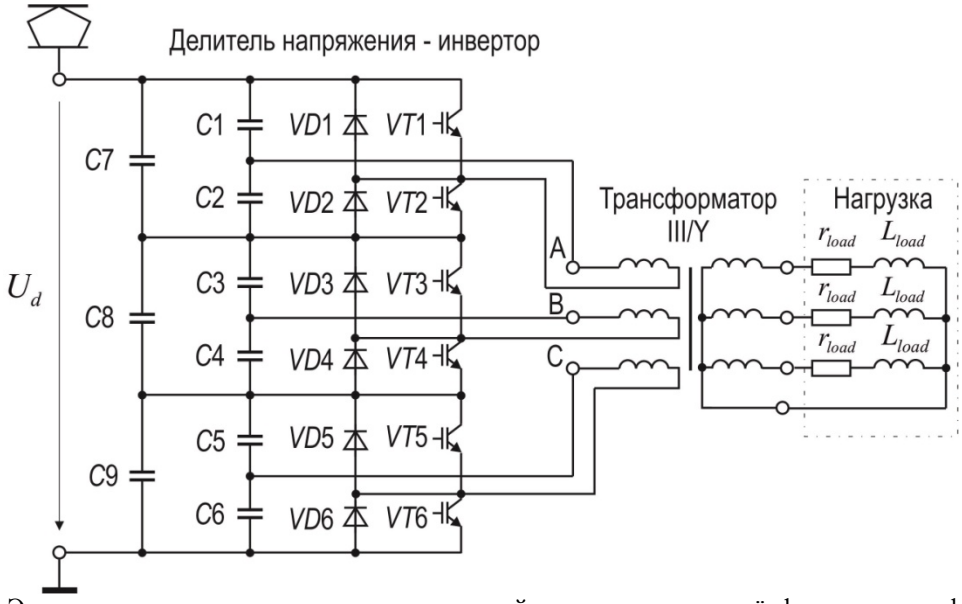


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема устройства для питания трёхфазных и однофазных вспомогательных цепей электровоза постоянного тока

3. Методы формирования выходного напряжения инвертора

С целью наилучшего использования входного постоянного напряжения U_d следует использовать при формировании наибольшего по условиям эксплуатации напряжения на первичной обмотке Т угол проводимости транзисторов $\Theta_{\Pi} = 180°$ эл. Таким образом, получим кривую напряжения в форме меандра. Для регулирования величины переменного напряжения можно в этом случае использовать прямоугольно-треугольную широтно-импульсную модуляцию (ШИМ): двуполярное напряжение несущей частоты треугольной формы, модулирующее напряжение в форме меандра (будем именовать это «Метод 1», см. рис. 2 а)).

Основной недостаток вышеописанного метода формирования напряжения (способа управления преобразователем) следует из гармонического состава сигнала формы меандра: содержатся все гармонические составляющие нечётных порядков, относительная амплитуда гармоники убывает обратно пропорционально её номеру. Третья гармоника напряжения весьма велика, что определяет значительность третьей гармоники тока первичной обмотки Т и дополнительных потерь от неё.

Для преодоления указанного недостатка предлагается в качестве модулирующего напряжения использовать форму сигнала «меандр с паузой» при ширине импульса 120° эл. (будем именовать это «Метод 2», см. рис. 2 б)).

Для сравнения в качестве «Метода 3» используем алгоритм синусоидально-треугольной ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой, имеющей амплитуду 0,167 от первой гармоники и перемодуляцией первой гармоники в $\pi/2$ раз (см. рис. 2 в)). Вводимая третья гармоника синфазна с первой.

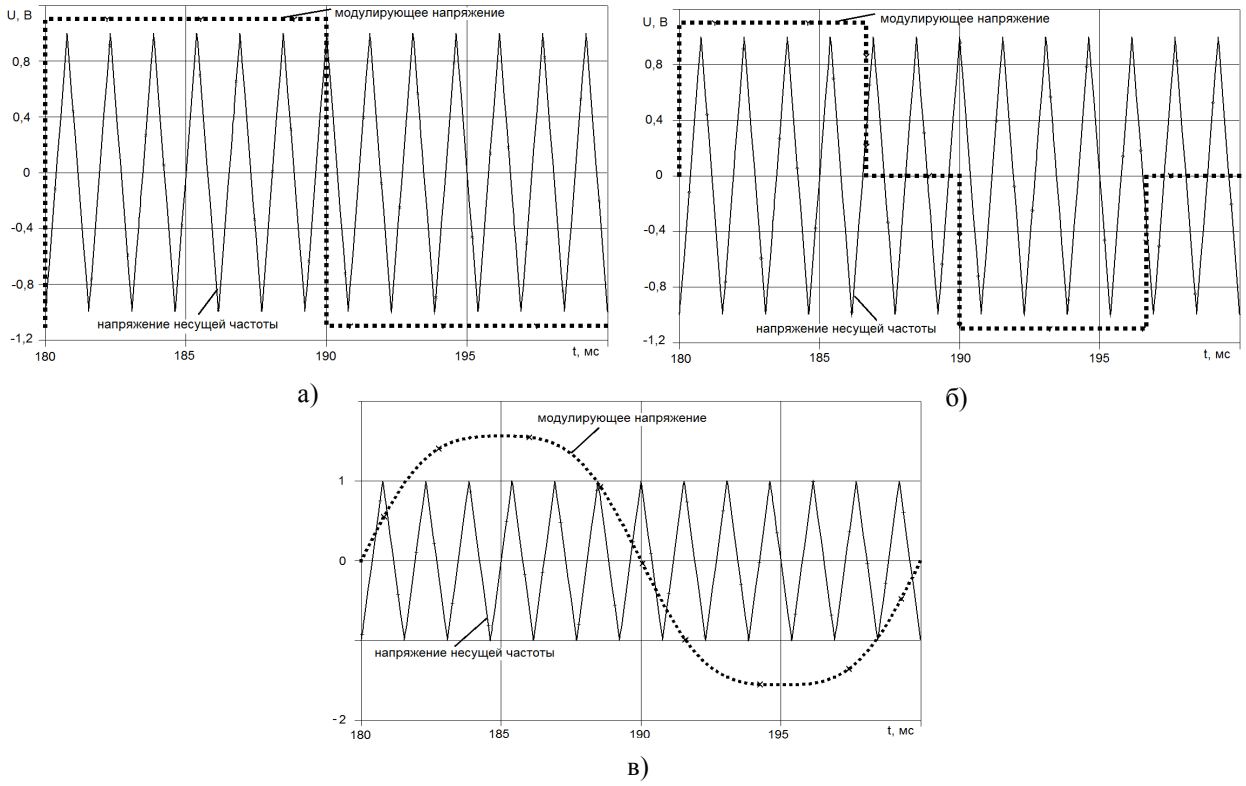


Рис. 2. Методы осуществления ШИМ напряжения фазы

При анализе режимов работы устройства питания вспомогательных цепей электровоза воспользуемся математической моделью трехфазного Т согласно [5]. Результаты компьютерного моделирования для трёх методов управления преобразователем сведены в таблицу 1.

Таблица 1 - Сравнительные результаты расчёта характеристик устройства для питания трёхфазных и однофазных вспомогательных цепей электровоза постоянного тока при различных методах формирования выходного напряжения АИН

Наименование характеристик	Напряжение 1-й гармоники фазы первичной обмотки Т	Активная мощность на выходе Т	Коэффициент мощности на входе Т	КПД Т	$\eta_T \cdot \cos\varphi_1$	-
Условное обозначение	$\overset{*}{U}_{1ф1}$	$\overset{*}{P}_2$	$\cos\varphi_1$	η_T	K_E	$K_E \cdot \overset{*}{U}_{1ф1}$
При частоте несущего напряжения 650 Гц (13 периодов несущего напряжения ШИМ на одном периоде модулирующего)						
Метод 1	1,000 (520,9 В)	1,000 (73,2 кВт)	0,845	0,917	0,775	0,775
Метод 2	0,859	0,759	0,829	0,970	0,804	0,691
Метод 3	0,969	0,925	0,833	0,939	0,782	0,758
При частоте несущего напряжения 600 Гц (12 периодов несущего напряжения ШИМ на одном периоде модулирующего)						
Метод 1	1,000 (518,7 В)	1,000 (73 кВт)	0,847	0,910	0,771	0,771
Метод 2	0,873	0,761	0,834	0,966	0,806	0,704
Метод 3	0,966	0,925	0,825	0,961	0,793	0,766

Во всех случаях параметры Т и нагрузки одинаковы. Нагрузка симметричная с $\cos\varphi = 0{,}88$. Частота модулирующего напряжения 50 Гц, $U_d = 3300$ В. Все значения величин в таблице 1 представлены в относительных единицах. Мгновенное значение напряжения на одном транзисторе не превышало 1220 В. При любом из рассмотренных методов невелики гармоники с порядками, кратными трём, в фазном и линейном напряжениях вторичной обмотки Т. Это положительно сказывается на гармоническом составе тока вторичной обмотки. Потенциал нейтральной точки нагрузки (рис. 1) близок к нулю. Предпочтительно, когда на периоде модулирующего напряжения укладывается нечётное количество периодов напряжения несущей частоты. В противном случае токи и напряжения преобразователя будут содержать четные гармоники (по данным таблицы 1 это слабо влияет на энергетические характеристики электротехнической системы). Метод 2 позволяет радикально уменьшить величину тока 3-й гармоники в первичной обмотке Т (до 11,09% от 1-й гармоники). При Методе 3: 3-я гармоника тока в первичной обмотке Т составляет 150,62 % от 1-й, что ниже, чем при Методе 1, где 212,76 %. Расчётные кривые напряжений и токов показаны для Метода 1 на рисунке 3 а), Метода 2 – на рисунке 3 б) и Метода 3 – рис. 3 в), где кривые: 1 – напряжение фазы первичной обмотки Т $U_{1ф}$, 2 – ток фазы первичной обмотки Т $I_{1ф}$, 3 – ток фазы вторичной обмотки Т $I_{2ф}$, 4 – напряжение фазы вторичной обмотки Т $U_{2ф}$, 5 – инвертированное по знаку линейное напряжение вторичной обмотки Т $U_{2л}$.

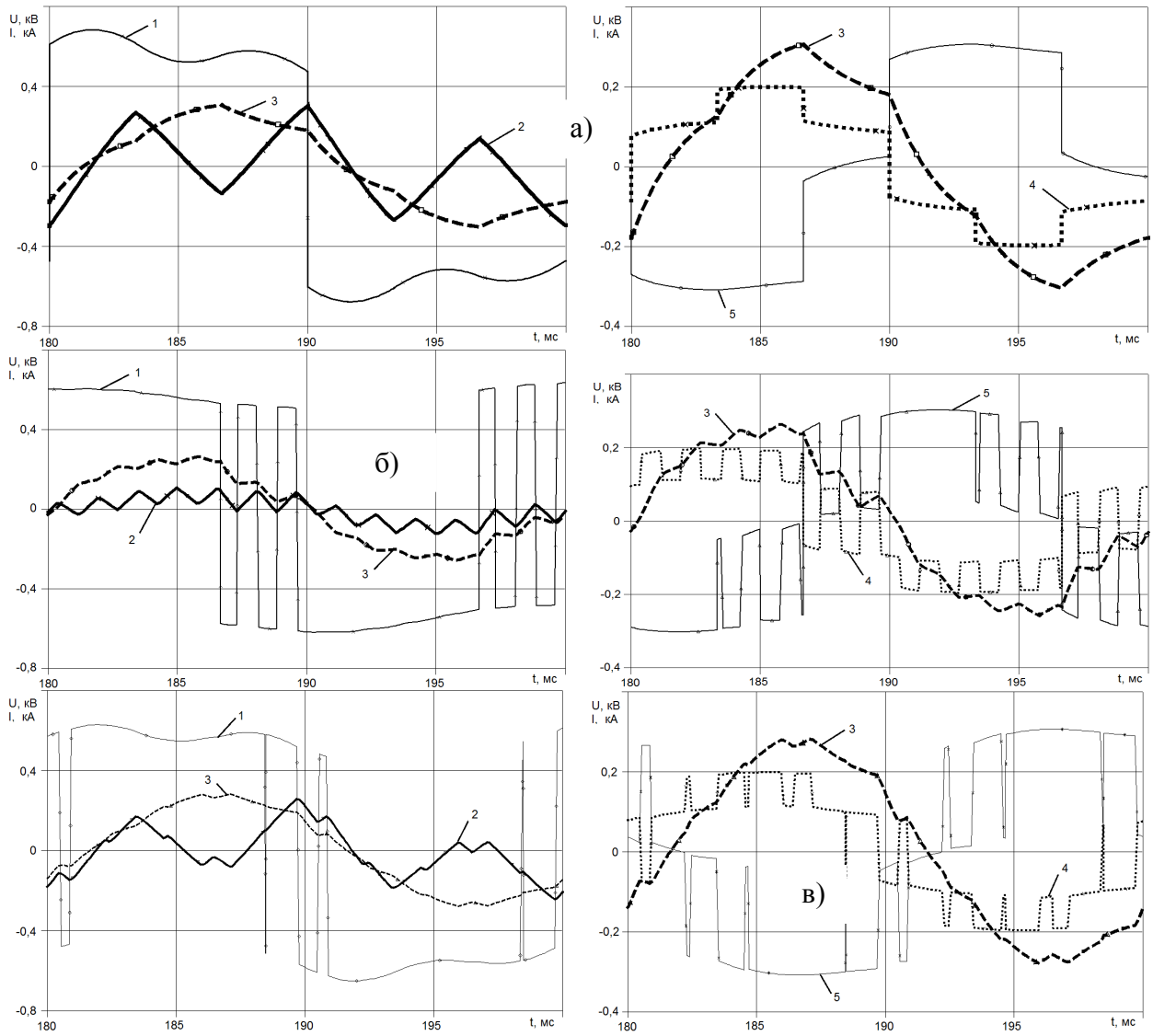


Рис. 3. Напряжения и токи Т при управлении АИН разными методами (результаты расчета)

Гармонический состав полученных кривых напряжений и токов приведен в таблице 2, где также представлены значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих THD, %. Частота 1-й гармоники составляет 50 Гц. Частота несущего напряжения ШИМ 650 Гц.

Выводы

Из таблицы 1 видно, что наивысшее значение энергетического фактора K_E демонстрирует Метод 2. Но он заметно проигрывает двум другим по использованию входного напряжения и, как следствие, по полезной мощности на выходе Т. Отсюда, по совокупности энергетических характеристик, то есть по значению произведения $\eta_{\text{Т}} \cdot \cos\varphi_1 \cdot \overset{*}{U}_{1\text{ф}}$, предпочтительнее Метод 3. Предложенная схема устройства питания вспомогательных цепей электровоза постоянного тока обладает следующими достоинствами: количество силовых транзисторов минимально, класс транзисторов по напряжению относительно низкий (допустимо использовать транзисторы с величиной рабочего напряжения 2,5 кВ с учетом возможности в контактной сети $U_d = 4$ кВ), что удешевляет устройство. Стоимость комплекта полупроводниковых ключей типа *HVIGBT* может быть снижена до 1,5 – 2,0 раз по сравнению с известными техническими решениями. Методы формирования выходного напряжения предложенного инвертора не отличаются от используемых в известных схемах, то есть могут применяться отработанные технологии построения системы управления преобразователем.

Таблица 2 - Сравнительный гармонический состав напряжений и токов

Метод	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Порядок гармоники k	$U_{1\text{ф}k}$, %			$I_{1\text{ф}k}$, %			$U_{2\text{ф}k}$, %			$I_{2\text{ф}k}$, %			$U_{2\text{л}k}$, %		
1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3	39,77	6,27	27,98	212,8	11,09	150,6	0,45	5,07	0,61	0,19	2,80	0,44	0,56	7,51	0,64
5	18,51	23,79	6,26	5,37	5,82	2,88	16,74	21,98	5,94	6,59	8,64	2,28	16,82	15,23	7,30
7	13,49	11,59	5,82	2,80	2,07	14,40	11,91	10,29	1,21	3,50	3,08	0,32	11,81	12,46	1,20
9	10,63	15,08	10,96	19,00	3,51	3,00	0,35	12,99	9,80	0,03	2,86	2,21	0,41	14,42	9,86
11	8,45	36,49	15,73	1,16	5,73	3,42	7,57	31,86	13,85	1,41	5,89	2,60	7,66	23,83	13,77
13	7,22	42,49	18,03	0,84	47,74	22,66	6,28	5,49	0,40	1,03	0,93	0,06	6,18	7,26	0,33
15	6,28	31,15	16,74	6,74	3,42	1,43	0,34	27,04	15,23	0,01	3,68	2,11	0,39	24,26	13,49
17	5,48	12,43	13,74	0,50	1,45	4,33	4,93	10,90	10,83	0,60	1,22	1,26	5,02	15,04	11,05
19	4,94	4,10	11,14	0,40	0,56	6,77	4,25	3,58	6,48	0,48	0,42	0,69	4,15	4,98	6,26
21	4,48	8,72	9,88	3,43	1,43	1,41	0,34	7,05	8,37	0,01	0,70	0,83	0,39	5,32	4,92
23	4,06	5,02	7,99	0,28	0,75	5,12	3,67	4,62	1,40	0,33	0,44	0,17	3,76	7,16	1,73
25	3,76	3,49	4,27	0,24	0,28	0,74	3,20	2,93	4,11	0,28	0,31	0,34	3,10	3,79	2,91
27	3,48	5,92	2,51	2,07	0,74	1,16	0,34	4,78	0,87	0,01	0,38	0,07	0,39	3,65	1,04
29	3,23	3,53	5,94	0,18	0,55	2,27	2,93	2,95	3,95	0,21	0,23	0,23	3,02	4,25	4,37
31	3,03	1,04	7,69	0,16	0,19	0,35	2,56	1,25	7,25	0,18	0,09	0,42	2,46	2,06	9,75
33	2,85	3,50	7,08	1,39	0,22	1,35	0,34	2,86	5,26	0,01	0,19	0,23	0,39	1,77	5,14
35	2,68	4,14	5,70	0,13	0,25	1,73	2,45	3,42	1,23	0,14	0,16	0,04	2,53	1,88	0,71
37	2,55	8,22	5,72	0,12	0,31	1,03	2,13	6,99	3,13	0,13	0,29	0,15	2,02	5,85	1,25
39	2,42	11,89	6,23	1,00	4,04	1,50	0,34	2,01	4,68	0,00	0,12	0,20	0,39	0,92	4,25
Действующее значение 1-й гармоники	$U_{1\text{ф}1}$, В			$I_{1\text{ф}1}$, А			$U_{2\text{ф}1}$, В			$I_{2\text{ф}1}$, А			$U_{2\text{л}1}$, В		
	520,86	447,18	504,70	66,01	52,62	63,20	134,82	115,82	129,69	201,68	173,19	193,04	234,97	208,55	229,13
THD, %	39,84	13,44	28,67	212,77	11,80	150,62	0,56	5,46	4,72	0,19	2,81	0,49	0,68	7,57	4,30

Библиографический список

1. Хоменко Б.И., Колпахчьян Г.И., Пехотский И.В. Вспомогательные транзисторные преобразователи для перспективного ЭПС // Электровозостроение: сб. науч. тр. – 2003. – Т.45. – С. 184–191.

2. Umezawa K. Power electronic devices for railway vehicles // FUJI Electric Review – 2012. – Vol. 58, No 4. – P. 175–181.
3. Macan M., Bahun I., Jakopovic Z. Output DC voltage elimination in PWM converters for railway applications // 17th int. conference on electrical drives and power electronics (EDPE 2011), The High Tatras, Slovakia 28–30 September, 2011 – Stará Lesná, 2011. – P. 49–54.
4. Пустоветов М.Ю. Теоретическое исследование потенциала нейтральной точки нагрузки и токов утечки в тяговом асинхронном электроприводе электровоза постоянного тока // Известия Транссиба. – 2012. – №4(12). – С. 116–122.
5. Пустоветов М.Ю. Универсальная математическая модель трёхфазного трансформатора с единым магнитопроводом // Электротехника. – 2015. – №2. – С. 57–60.

УДК 658.284; ГРНТИ 52.01.86

СИСТЕМА ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВА ДЛЯ МАЛЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА БАЗЕ GSM ИНФОРМАТОРА ESIM252 ФИРМЫ ELDES

Д.Ю. Хохлов, А.В. Баранов
Тамбовский государственный технический университет,
Россия, Тамбов, xenon-1987@mail.ru, alex7668@rambler.ru

Аннотация. В настоящей работе рассматривается вариант практической реализации системы диспетчеризации электрохозяйства для малых предприятий с применением GSM информатора ESIM252 фирмы Eldes. Подробно описываются основные преимущества и принципы работы данной системы. Приводятся ее принципиальная схема и спецификация основного оборудования.
Ключевые слова: система диспетчеризации, электрохозяйство, малые предприятия, GSM информатор, текущий оперативный контроль.

DISPATCHING SYSTEM OF ELECTRICAL FACILITIES FOR SMALL ENTERPRISES BASED ON ELDES ESIM252 GSM DIALLER

D.Yu. Khokhlov, A.V. Baranov
Tambov State Technical University,
Russia, Tambov, xenon-1987@mail.ru, alex7668@rambler.ru

Abstract. This paper deals with a variant of practical implementation of dispatching system of electrical facilities for small enterprises based on Eldes ESIM252 GSM dialler. It is spoken in detail about main advantages and operating principles of this system. Its wiring diagram and in-line equipment specification is provided.
Keywords: dispatching system, electrical facilities, small enterprises, GSM dialler, current operation monitoring.

В настоящее время системы диспетчеризации широко используются в электроэнергетике. С их помощью осуществляется текущий оперативный контроль работы электрических установок и сетей, производится дистанционное управление элементами энергосистем. Как правило, все подобные системы являются SCADA-системами [1, 2, 3].

Однако современные SCADA-системы от ведущих разработчиков малопригодны для организации систем диспетчеризации электрохозяйства на малых предприятиях, так как характеризуются избыточной для этого функциональностью, значительной стоимостью, высокими требованиями к квалификации эксплуатационного персонала, и, кроме того, не всегда совместимы с имеющимся на предприятии электрооборудованием. Поэтому в подавляющем большинстве случаев руководство малых предприятий отказывается от внедрения SCADA-систем.

Вместе с тем опыт эксплуатации электрохозяйства малых предприятий показывает, что материальный ущерб, вызванный, к примеру, отсутствием или несвоевременным поступлением информации о перебоях в электроснабжении, может быть весьма существенным. Неслучайно опрос ответственных должностных лиц и руководителей ряда малых предприятий, проведенный авторами, выявил, что подавляющее большинство из них хотело бы иметь на предприятии хотя бы простейшую систему диспетчеризации электрохозяйства, основной функцией которой являлось бы оперативное их информирование о возникновении перебоев в электроснабжении с целью принятия мер по минимизации возможного ущерба. Система должна быть недорога, проста в эксплуатации, работоспособна в широком диапазоне температур и доступна для самостоятельного программирования персоналом, не обладающим существенными познаниями в электронике и вычислительной технике.

С учетом вышеуказанных пожеланий авторами была осуществлена разработка варианта практической реализации подобной системы. Данный вариант является базовым и предназначен для предприятий, имеющих три независимых взаимно резервирующих источника питания. Основой для его построения в результате технико-экономического сопоставления был выбран GSM информатор ESIM252 фирмы Eldes [4].

Разработанный вариант системы характеризуется следующими преимуществами:

- функционирует в любых GSM сетях общего пользования, работающих в диапазонах частот 850/900/1800/1900 МГц, что позволяет отказаться от строительства проводных линий связи, а в качестве оконечных устройств использовать сотовые или стационарные телефоны;
- обеспечивает возможность текущего оперативного контроля состояния двух трехфазных электрических вводов напряжением 380/220 В переменного тока промышленной частоты с отправкой SMS уведомлений либо голосовыми звонками на 5 предварительно запрограммированных номеров в случае изменения состояния вводов (используются предварительно записанные в память системы голосовые и текстовые уведомления);
- обеспечивает возможность текущего оперативного контроля состояния резервного источника питания (к примеру, дизель-генераторной установки) посредством информирования о его пуске, останове, неисправности;
- осуществляет отправку контрольных SMS уведомлений о работоспособности системы по расписанию, заданному при программировании;
- обеспечивает возможность дистанционного управления посредством SMS уведомлений двумя исполнительными устройствами при помощи двух независимых релейных выходов (дистанционный принудительный останов дизель-генераторной установки, включение аварийного звукового сигнала для привлечения внимания персонала и другие подобные операции) – опционально;
- обеспечивает возможность дистанционного прослушивания ситуации в помещении, где установлена система – опционально (требуется подключение микрофона);
- легко программируется посредством использования бесплатного программного обеспечения ELDES ConfigTool, находящегося в открытом доступе (осуществляется посредством USB подключения GSM информатора к любому персональному компьютеру на базе ОС семейства MS Windows);
- гарантированно работоспособен в диапазоне температур -20...+55°С.

Принципиальная схема базового варианта системы представлена на рисунке 1.

Основой системы является GSM информатор Eldes ESIM252 (блок А2), получающий питание от существующей электрической сети предприятия напряжением 220 В переменного тока промышленной частоты через блок питания с выходным напряжением 12 В постоянного тока с функцией ИБП (блок А1), к которому подключена дополнительная аккумуляторная батарея (блок А6), необходимая для поддержания работоспособности системы во время перебоев в электроснабжении. Продолжительность работы системы от батареи составляет не менее 60 часов, срок службы батареи – не менее 8 лет. Сигналы о состоянии двух трехфазных электрических вводов напряжением 380/220 В переменного тока промышленной частоты и резервного источника питания формируются тремя специализированными реле контроля напряжения (блоки А2-А4), реагирующими как на перебои в электроснабжении, так и на ряд других характерных аварийных режимов, представляющих опасность для персонала и технологического оборудования (пониженное или повышенное напряжение, обрыв фазы или нулевого проводника). Сигнал о неисправности резервного источника питания формируется релейным выходом его комплектной панели управления.

Перечень рекомендуемого комплекта основного оборудования, необходимого для построения базового варианта системы диспетчеризации, приведен в таблице 1. Стоимость данного комплекта в ценах IV квартала 2016 г. составляет порядка 30 тыс. рублей, при этом часть оборудования может быть заменена аналогичным других производителей (реле контроля напряжения, автоматические выключатели, аккумуляторная батарея, корпус).

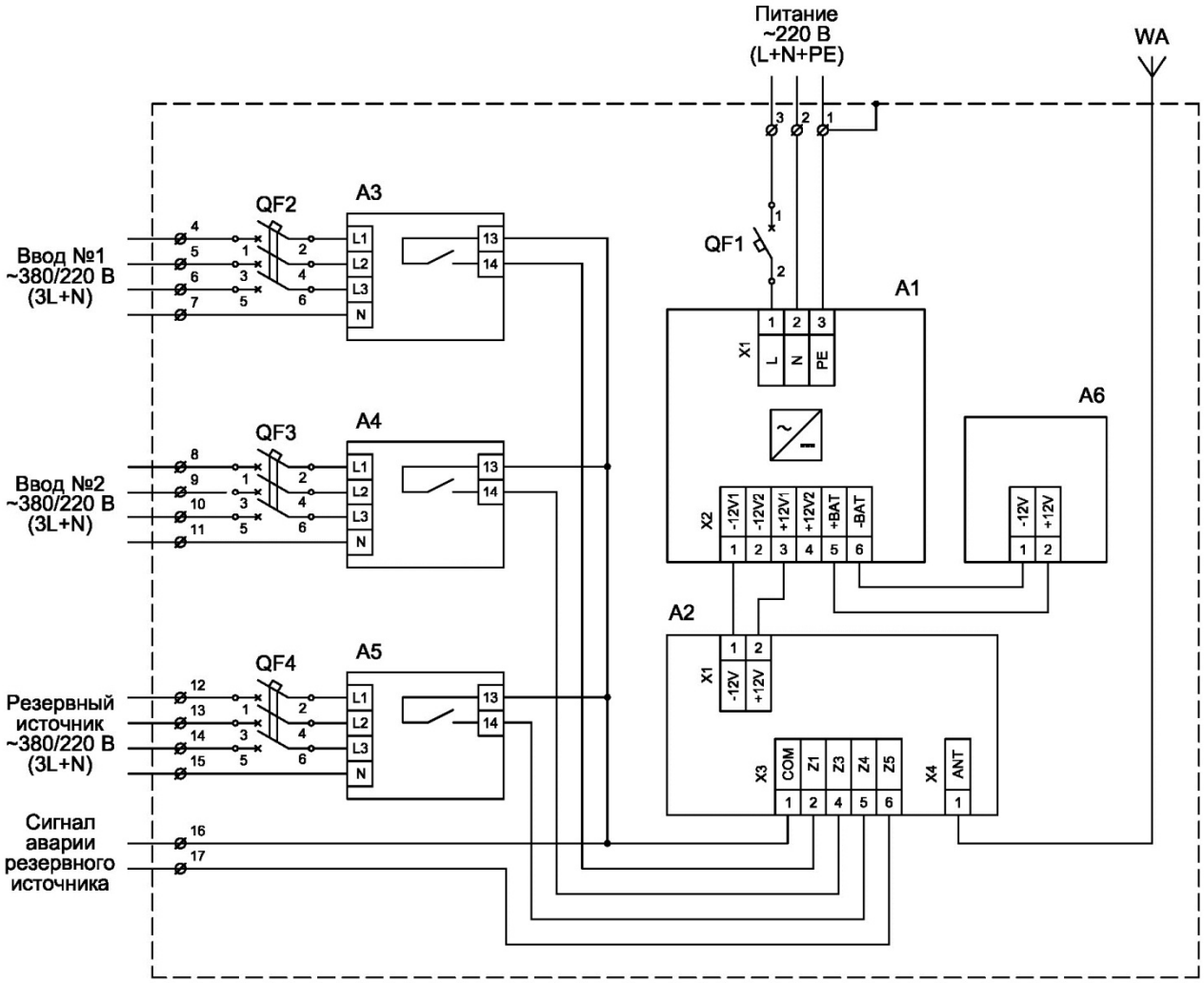


Рис. 1. Принципиальная схема базового варианта системы диспетчеризации

Таблица 1 - Спецификация основного оборудования базового варианта системы диспетчеризации

№ п/п	Обозначение	Наименование	Количество	Тип
1	QF1	Выключатель автоматический с комбинированным расцепителем, однополюсный	1	Legrand DX³-E C6A-1P (артикул 407260)
2	QF2, QF3, QF4	Выключатель автоматический с комбинированным расцепителем, трехполюсный	3	Legrand DX³-E C6A-3P (артикул 407855)
3	A1	Блок питания с функцией ИБП, выходное напряжение 12 В постоянного тока	1	Mean Well DRC-100A
4	A2, WA	GSM информатор (с антенной в комплекте)	1	Eldes ESIM252
5	A3, A4, A5	Реле контроля напряжения, трехфазное, один нормально открытый контакт	3	ABB CM-PVE (артикул 1SVR55070R9400)
6	A6	Свинцово-кислотная герметичная аккумуляторная батарея, напряжение 12 В, емкость 4,5 А*ч	1	Delta HR 12-4.5
7	-	Корпус металлический с монтажной панелью, размер 500x400x200 мм	1	Legrand Atlantic IP66 (артикул 039939)

Сечения применяемых при сборке системы медных проводников должны составлять для силовых цепей – не менее 2,5 мм^2, для цепей управления – не менее 1,5 мм^2. Вспомогательные материалы (клеммы, рейки, зажимы) могут применяться любые сертифицированные, рассчитанные на напряжение не менее 250 В переменного тока промышленной частоты и рабочий ток не менее 16 А.

GSM информатор программируется при помощи программного обеспечения ELDES ConfigTool таким образом, что задействуются его входы с номерами 1, 3, 4, 5, при этом за-

держка каждого из указанных входов задается 10000 мс, а уровни – NC для входов с номерами 1, 3, 4 и NO – для входа с номером 5. Тексты SMS уведомлений (не более 24 латинских символов) указываются в полях «Тревога» и «Восстановление» графического интерфейса. К примеру, для входа с номером 1, отвечающего за передачу информации о состоянии первого трехфазного электрического ввода, тексты соответствующих SMS уведомлений могут быть «Avariya vvoda #1!» и «Vvod #1 vosstanovlen!».

Промышленная апробация базового варианта системы диспетчеризации была осуществлена на ряде объектов филиала ПАО «МТС», расположенных в г. Тамбове. Фотография одного из изготовленных экземпляров апробируемой системы представлена на рисунке 2. По результатам апробации ответственными должностными лицами и эксплуатационным персоналом филиала был отмечен существенный вклад системы в комплексное повышение надежности электроснабжения, все заявленные характеристики и преимущества были полностью подтверждены.

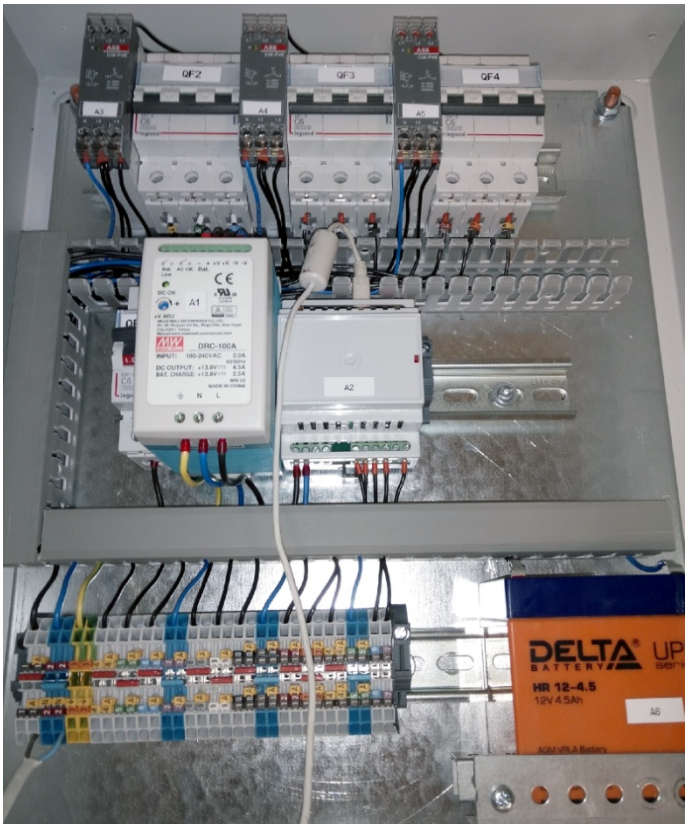


Рис. 2. Изготовленный экземпляр базового варианта системы диспетчеризации

В случае если на предприятии имеется всего два либо один источник питания, базовый вариант системы диспетчеризации легко масштабируется посредством уменьшения количества входных цепей (реле контроля напряжения с относящимися к ним автоматическими выключателями). А при необходимости увеличения количества оповещаемых абонентов до 10 возможна установка дополнительного GSM информатора, подключаемого параллельно существующему (место под установку дополнительного GSM информатора можно видеть на рисунке 2).

Таким образом, предложенные решения позволяют реализовать достаточно гибкую и функциональную систему диспетчеризации электрохозяйства для малых предприятий, отличающуюся простотой схемотехнических решений, легкостью настройки, возможностью эксплуатации в широком диапазоне температур (-20...+55°С) и сравнительно низкой стоимостью как компонентов самой системы, так и владения ей. Кроме того, функциональность предложенной системы диспетчеризации может быть легко расширена непосредственно на предприятии силами эксплуатационного персонала, что в современных условиях является существенным преимуществом.

Библиографический список

1. Шерешевский, Л.А. Применение систем телемеханики Siemens в энергетике / Л.А. Шерешевский // Автоматизация и IT в энергетике. – 2009. – № 1. – С. 4-9.
2. Апухтин, Д.Ю. SCADA-система «АТЛАНТ» как комплексное решение автоматизации объектов электроэнергетики / Д.Ю. Апухтин, А.С. Лифшиц, А.А. Савинов // Информатизация и системы управления в промышленности. – 2009. – № 2(22). – С. 34-35.
3. Пинаев, А.Л. ELIPSE POWER – специализированная SCADA-система для задач энергетики / А.Л. Пинаев // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 9. – С. 62-64.
4. GSM система управления ESIM252. Руководство пользователя. – 2015. – Режим доступа : https://eldesalarms.com/wp-content/uploads/2015/07/ESIM252-rukovodstvo-polzovatelya-2015-04-23.pdf (дата обращения: 17.01.2017).

УДК 621.314:62-83

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

А.К. Муконин

Воронежский государственный технический университет,
Российская Федерация, Воронеж, mukonin_ak@mail.ru

Аннотация. Рассматривается универсальное преобразовательное устройство, на основе которого можно реализовать как классические схемы преобразователей частоты, так и их нетрадиционные варианты, в частности, с удвоителем напряжения. Применение устройства позволяет расширить диапазон частот электропривода при питании трехфазным или однофазным напряжением, сохраняя соединение трехфазной обмотки двигателя в звезду.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, преобразователь частоты

UNIVERSAL FREQUENCY CONVERTER FOR MOTOR CONTROLLER

A.K.Mukonin

Voronezh State Technical University ,
Russian Federation, Voronezh, mukonin_ak@mail.ru

Abstract. A universal converter is considered, which can be used to build both classical frequency converters and untraditional ones, such as with a voltage doubler. Using this device allows to increase the frequency range of a motor controller (both AC and DC) while keeping Y (star) connection.

Keywords: frequency electric drive, frequency converter

Частотно - регулируемые электроприводы с трехфазными асинхронными двигателями (АД) обычно содержат преобразователь частоты (ПЧ) с промежуточным звеном постоянного напряжения (ЗПН), выполненный по схеме «неуправляемый выпрямитель – автономный инвертор напряжения» (НВ-АИН). Множество вариантов системы НВ-АИН можно обобщить схемой на рисунке 1, содержащей неуправляемый выпрямитель НВ, фильтр Ф1, блок торможения БТ и инвертор АИН, который питает статорную обмотку двигателя М1. В общем случае ПЧ подключается к трехфазной четырехпроводной сети.

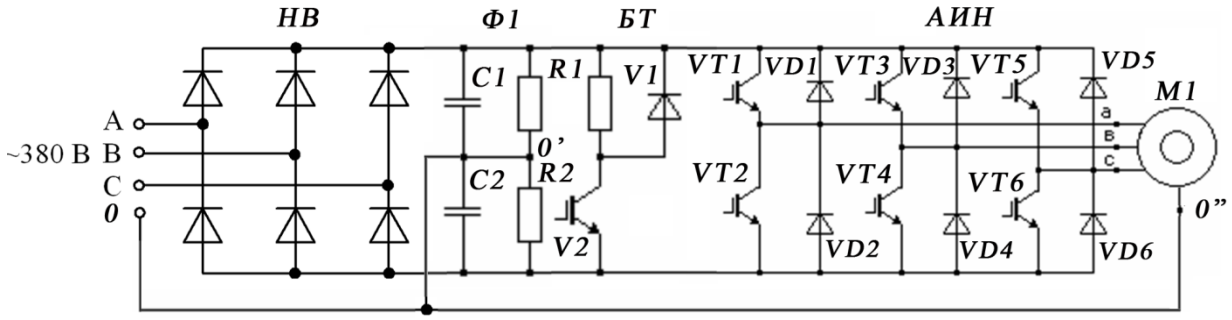


Рис.1. Схема силовой части универсального преобразователя частоты

В классических ПЧ с питанием трехфазным напряжением 380В отсутствует соединение общей точки конденсаторов фильтра Ф1 с нулевым проводом сети, а трехфазная обмотка двигателя М1 соединяется в звезду без нулевого провода. В таком случае выпрямитель и АИН функционируют как трехфазные мостовые схемы. Последовательное соединение

конденсаторов фильтра обусловлено тем, что их допустимые напряжения обычно равны 400-450В, а напряжение на выходе выпрямителя НВ превышает 500В. Для выравнивания напряжений конденсаторы шунтируют резисторами R1,R2.

Ряд ПЧ рассчитан на питание от однофазного напряжения 220В или от трехфазной сети с линейными напряжениями не 380В, а 220В. В таких ПЧ также используется трехфазный мостовой диодный выпрямитель и трехфазный мостовой АИН, но последовательное соединение конденсаторов в фильтре отсутствует. Трехфазная обмотка двигателя соединяется в треугольник. При однофазном питании напряжение подается на две входные клеммы диодного моста.

Соединение трехфазной обмотки в звезду или треугольник определяется уровнями выходных напряжений ПЧ, которые зависят от напряжения U_d на входе АИН и от последовательности коммутации транзисторов инвертора. Широкое применение в ПЧ нашли два алгоритма коммутации ключей АИН - "симметричная" широтно-импульсная модуляция (ШИМ) и "векторная" ШИМ /1/. Оба алгоритма позволяют формировать на выходе АИН трёхфазные напряжения, основные гармоники которых изменяются по синусоидальному закону. Обозначим максимально возможные действующие значения выходных линейных синусоидальных напряжений трёхфазного мостового АИН как $U_{лmax}$. Если пренебречь падением напряжения на вентилях АИН, при симметричной ШИМ справедливо соотношение:

$$U_{Лmax} \approx 0.614U_d. \quad (1)$$

Когда используется векторная ШИМ,

$$U_{Лmax} \approx 0.707U_d. \quad (2)$$

При соединении трёхфазной обмотки двигателя в звезду его номинальные линейные напряжения равны 380В, а при соединении в треугольник – 220В.

Исходя из (1), (2), можно определить значения U_d, необходимые для получения номинальных напряжений двигателя при симметричной и векторной ШИМ трехфазного мостового АИН – таблица 1.

Таблица1

Тип ШИМ	$U_{л\,max}$, В	U_d, В
симметричная	380	622
	220	360
векторная	380	537
	220	311

Близкие к 537В напряжения U_d обеспечиваются в классическом ПЧ с трехфазным входным напряжением 380В. В этом случае обмотка двигателя соединяется в звезду. В преобразователях с напряжением питания 220В входное напряжение АИН близко к 300В, соответственно его выходное напряжение не превышает 220В. Исходя из этого, трехфазную обмотку АД необходимо соединять в треугольник, что приводит к протеканию в двигателе нежелательных токов нулевой последовательности.

Существенно расширить функциональные возможности ПЧ можно за счет включения в схему питания общей точки соединения конденсаторов фильтра, получив универсальный преобразователь (УПЧ) – рис.1. Классические варианты ПЧ являются частными случаями УПЧ.

К одной из разновидностей УПЧ можно отнести схему, в которой трехфазная обмотка двигателя соединена в звезду без нулевого провода, а общая точка конденсаторов фильтра соединена с нулем сети. При питании от трехфазной четырехпроводной сети в таком ПЧ выпрямитель можно назвать сдвоенным трехфазным нулевым /2/.Использование сдвоенного трехфазного нулевого выпрямителя (СТНВ) вместо трехфазного мостового обеспечивает повышение напряжение питания двигателя, что позволяет увеличить верхнюю границу частот привода.

В /3/ приводятся результаты сравнения классического ПЧ и преобразователя с СТНВ, полученные на основе моделирования. Параметры модели: трехфазный источник синусоидальных фазных ЭДС с их действующими значениями 220В имеет индуктивность и активное сопротивление фазы 200 мкГн и 0,1Ом; мощность, потребляемая от звена постоянного напряжения, равна 175 Вт; емкость каждого из конденсаторов С1, С2 (см. рис. 1) – 65 мкФ. Некоторые параметры сравниваемых схем приведены в таблице 2.

Таблица 2

Выпрямитель	U_d, В	$U_{л\,max}$, В	Iд, А	Im,A
Трехфазный мост	533	377	0,615	2,29
СТНВ	600	424	0,745	3,7

В данной таблице U_d - среднее значение выпрямленного напряжения, Iд и Im – действующее и амплитудное значения тока сети. Величина $U_{л\,max}$ определялась по (2).

Из таблицы 2 следует, что применение СТНВ позволяет примерно на 11% увеличить выходное напряжение ПЧ. Основным недостатком преобразователя с СНТВ является ухудшение влияния на питающую сеть. От указанного недостатка во многом можно избавиться, обеспечивая при частотах вплоть до номинальной частоты двигателя отключение нулевого провода. При этом ПЧ работает как классическая схема.

Если питать ПЧ на рисунке 1 однофазным напряжением 220В, подав его на две любые входные клеммы трехфазного моста, выпрямитель работает как однофазный диодный мост. Если данное напряжение подать на любой из выводов А,В,С и на клемму 0, выпрямитель функционирует как удвоитель напряжения.

Результаты моделирования классического ПЧ с однофазным питанием и преобразователя частоты с удвоителем напряжения (ПЧ УН) приведены в /3/.Мощность, потребляемая от звена постоянного напряжения (ЗПН), задавалась равной 175Вт, емкость фильтра в классическом ПЧ равна 170 мкФ, а в ПЧ УН емкость каждого из конденсаторов составляет 85 мкФ. Значения емкостей выбирались, исходя из заданного размаха пульсаций напряжения на выходе ЗПН $K_{пu}$ = 0,05 .Величина $K_{пu}$ определялась как $K_{пu} = (U_{max} - U_{min})/2U_d$, где U_{max} и U_{min} - максимальное и минимальное значения выходного напряжения ЗПН.

Некоторые из результатов моделирования отражены в таблице 3.

Таблица 3

Выпрямитель	U_d, В	$U_{л\,max}$, В	Iд, А	Im,A
Однофазный мост	294	208	1,7	7,0
Удвоитель напряжения	552	390	1,5	5,35

Из таблицы 3 следует, что при однофазном питании в ПЧ УН достижимые выходные напряжения даже больше, чем в классическом ПЧ с трехфазным входным напряжением 380В. Уровень выходных напряжений ПЧ УН позволяет соединять трехфазную обмотку двигателя в звезду.

Следует также отметить, что влияние на сеть ПЧ УН (см. таблицу 3) является более благоприятным, чем классического преобразователя с однофазным мостовым выпрямителем.

Частным случаем схемы на рисунке 1 является ПЧ с трехфазным нулевым АИН, когда обмотка двигателя соединяется в звезду с нулевым проводом. Данный провод подключается к выводу 0 схемы. Трехфазный нулевой АИН имеет большие функциональные возможности, чем трехфазный мостовой.

Для пояснения данного утверждения отметим, что традиционные трехфазные мостовые инверторы формируют в трехфазной обмотке токи, основные гармоники которых образуют трехфазную систему синусоид, высокочастотные пульсации токов при этом незначительны. Питание электродвигателя синусоидальными токами создает в нем круговое равномерно вращающееся магнитное поле (КРВП). Вместе с тем, в трехфазном двигателе КРВП может быть создано при различной форме фазных токов. Применение несинусоидальных токов позволяет улучшить ряд характеристик привода /2/. Трехфазный нулевой АИН, в отли-

чие от трехфазного мостового, позволяет питать трехфазную обмотку токами различной формы.

Трехфазную систему синусоидальных напряжений можно сформировать с помощью двухфазного нулевого АИН, содержащего на треть меньшее количество транзисторных ключей, чем трехфазные мостовой и нулевой инверторы /2/. Двухфазный нулевой АИН можно реализовать, исключив в АИН на рисунке 1 одну из стоек и оставив выводы, например, а, в и 0. К этим выводам можно подключить трехфазную обмотку двигателя, соединенную в треугольник или звезду.

В ответственных объектах часто требуется сохранение работоспособности электропривода при неисправности питающей сети. Схема на рисунке 1 сохраняет работоспособность при обрыве любых двух проводов сети.

Универсальный преобразователь можно реализовать на основе серийных ПЧ с трехфазным питанием 380В за счет соединения общей точки конденсаторов фильтра с нулевым проводом сети. Рассматриваемая схема питания была экспериментально проверена в приводе фирмы ABB ACS355-03x-08-A8-4. Стандартный вариант не работает при однофазном входном напряжении 220В. Подключение точки соединения конденсаторов фильтра к нулю сети обеспечивает работоспособность как при трехфазном питании 380В так и однофазном питании 220В.

Основные выводы

1. Рассмотренное преобразовательное устройство позволяет реализовать как классические схемы преобразователей частоты (ПЧ), так и нетрадиционные варианты, в частности, с удвоителем напряжения и со сдвоенным трехфазным нулевым выпрямителем.

2. Универсальный преобразователь частоты можно питать как трехфазным напряжением 380В, так и однофазным напряжением 220В, сохраняя соединение обмотки двигателя в звезду.

3. Недостатком классического ПЧ с однофазным питанием является необходимость соединения трехфазной обмотки двигателя в треугольник, что приводит к протеканию в двигателе нежелательных токов нулевой последовательности. Применение в схеме ПЧ удвоителя напряжения позволяет устранить указанный недостаток.

4. Использование в схеме ПЧ сдвоенного трехфазного нулевого выпрямителя обеспечивает повышение напряжения питания двигателя, что позволяет увеличить верхнюю границу частот электропривода. Данный эффект имеет место и в ПЧ с удвоителем напряжения.

5. Реализовать универсальный ПЧ можно на основе серийно выпускаемых преобразователей за счет включения в схему питания общей точки соединения конденсаторов фильтра.

Библиографический список

1. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением / Г.Г. Соколовский. –М.: Издательский центр “Академия”,2006.-272 с.

2. Муконин А.К. Частотные приводы с токовым управлением / А.К. Муконин, А.И. Шиянов – Воронеж: ВГТУ, 2006. - 142 с.

3. Муконин А.К. О совершенствовании характеристик частотного электропривода/ А.К. Муконин, А.Е.Богомазов // Электротехнические комплексы и системы управления: науч.-технич. журнал – Воронеж: ВГТУ, 2015, №3 . С. 43-49.

4. Муконин А.К. Энергетические соотношения в частотном приводе с квазитрапецеидальной формой токов / А.К. Муконин, М.В. Кочегаров // Вычислительные машины, автоматика и робототехника: Материалы науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых. Воронеж: ВГТУ, 2008. С. 34-39.

УДК 621313; ГРНТИ 45.29.31

УРАВНЕНИЯ НЕСИММЕТРИЧНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ВКЛЮЧАЕМЫХ В ОДНОФАЗНУЮ СЕТЬ

Д.А. Тонн
Воронежский государственный технический университет,
Россия, Воронеж, tonnda@yandex.ru

Аннотация. В данной работе рассматриваются математические модели некоторых схем включения в однофазную сеть переменного тока несимметричных однофазных асинхронных двигателей.

Ключевые слова: схемы включения, однофазные асинхронные двигатели, математические модели.

EQUATIONS OF AN ASYMMETRIC INDUCTION MOTOR SWITCHED IN SINGLE PHASE

D.A. Tonn
Voronezh State Technical University,
Russia, Voronezh, tonnda@yandex.ru

Abstract. In this paper considered mathematical models some switching circuit asymmetrical single-phase induction motor in single-phase AC power.

Keywords: switching circuits, single-phase induction motors, mathematical models.

Асинхронные двигатели с несимметрией статора находят широкое практическое применение, в то время как машины с несимметрией ротора практически не используются [1]. Несимметричные электрические машины обладают существенной нелинейностью связей физических явлений, протекающих в них, даже в установившихся режимах работы. Это следует обязательно учитывать при их математическом описании, и что значительно усложняет анализ режимов работы таких машин.Типичным примером однофазной асинхронной машины с несимметрией статора может служить конденсаторный асинхронный двигатель (КАД), который представляет из себя асинхронный двигатель имеющий на статоре две фазные обмотки, сдвинутые в пространстве на 90° электрических градусов, и симметричный короткозамкнутый ротор. Одна из обмоток статора (главная) включается непосредственно в однофазную сеть, а другая обмотка (вспомогательная) включается в эту же сеть, но через фазосдвигающий элемент, чаще всего его роль выполняет рабочий конденсатор. Физические процессы, протекающие в различных режимах работы таких электрических машин, носят сложный характер, и представляют собой электромеханические переходные процессы, так как при этом происходит одновременное изменение скорости вращения и электромагнитных характеристик двигателя.

При составлении уравнений несимметричных асинхронных двигателей, в качестве исходного, как наиболее общий случай, сначала рассмотрим однофазный асинхронный двигатель (ОАД) с общей несимметрией статора, которая выражается в неравенстве параметров фаз статора, в отличии угла между осями обмоток статора от $2\pi/m$ электрических радиан, в неравенстве числа витков фаз статора. Путем принятия ряда допущений уравнения рассмотренного ОАД могут быть просто преобразованы в уравнения КАД, имеющего различные схемы включения, в уравнения других типов ОАД или даже в уравнения трехфазных асинхронного двигателя, работающих в различных схемах однофазного включения.

Система дифференциальных уравнений, описывающая поведение асинхронного двигателя с общей несимметрией статора включает в себя уравнения равновесия напряжений обмоток и уравнение движения электропривода.

При составлении уравнений равновесия напряжения сначала целесообразно использовать фазовую (естественную) систему координатных осей. При этом предполагаем, что обмотка ротора приведена к обмотке статора [1]. Дифференциальные уравнения двухфазной асинхронной машины с общей несимметрией статора в естественной (фазовой) системе координат содержат периодические коэффициенты, что существенно затрудняет решение системы. С целью снижения объема вычислений и ускорения практических расчетов данную систему уравнений нужно преобразовать в систему с постоянными коэффициентами.

Для того чтобы избавиться от периодических коэффициентов в уравнениях обычно применяют метод преобразования координат, то есть используют их линейные преобразова-

ния. Преобразование координат позволяет упростить уравнения и получить постоянные коэффициенты перед переменными, но не уменьшает число уравнений системы.

Дифференциальные уравнения, описывающие работу электрической машины, имеют постоянные коэффициенты только в том случае, когда оси обмоток статора и ротора неподвижны друг относительно друга. Уравнения электрической машины могут быть записаны в различных системах координатных осей [1].

Считается, что в электромеханике существует бесчисленное число систем координат, но на практике находят применение лишь наиболее удобные [1]. Для двухфазной асинхронной машины с общей несимметрией статора избавится от периодических коэффициентов можно, записав её уравнения в ортогональной системе координат, неподвижной относительно статора, то есть в системе координат α, β. В этом случае в любой момент времени реальные переменные ротора заменяются их проекциями на оси статорных обмоток. Полученные при этом уравнения записаны уже в неподвижных координатных осях, которые жестко связаны с обмоткой статора. Следует отметить, что такое преобразование возможно лишь в том случае, когда ротор симметричен.

Эта система уже не содержит периодически изменяющихся во времени коэффициентов. Для её решения численными методами с применением вычислительной техники необходимо представить эту систему в нормальном виде. Для этого нужно решить систему уравнений относительно токов и подставить их значения в систему, а также выразить электромагнитный момент $M_{эм}$ через потокосцепления и параметры машины.

Система дифференциальных уравнений ОАД с общей несимметрией статора в системе координат α, β и в относительных единицах будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \dfrac{d\psi_a}{d\tau} = u_a \, sin(\tau + \varphi_0) - r_a \, i_a, \\ \dfrac{d\psi_в}{d\tau} = u_в \, sin(\tau + \varphi_0) - r_в \, i_в, \\ \dfrac{d\psi_{э\alpha}}{d\tau} = \psi_{э\beta}\omega - r_э \, i_{э\alpha}, \\ \dfrac{d\psi_{э\beta}}{d\tau} = -\psi_{э\alpha}\omega - r_э \, i_{э\beta}, \\ \dfrac{d\omega}{d\tau} = \dfrac{1}{H}(M_{эм} - M_c), \end{cases}$$

где

$$M_{эм} = x_m(i_a \cdot i_{э\beta} + i_в \cdot (i_{э\beta} \cdot cos(\Theta) - i_{э\alpha} \cdot sin(\Theta))).$$

Связь между токами обмоток и потокосцеплениями устанавливается уравнениями:

$$\begin{cases} \psi_\alpha = x_a \cdot i_a + x_m \cdot i_{э\alpha} + x_m \cdot cos(\Theta) \cdot i_в, \\ \psi_\beta = x_в \cdot i_в + x_m \cdot (i_{э\alpha} \cdot cos(\Theta) + i_{э\beta} \cdot sin(\Theta)) + x_m \cdot cos(\Theta) \cdot i_a, \\ \psi_{э\alpha} = x_э \cdot i_{э\alpha} + x_m \cdot cos(\Theta) \cdot i_d + x_m \cdot i_a, \\ \psi_{э\beta} = x_э \cdot i_{э\beta} + x_m \cdot sin(\Theta) \cdot i_в. \end{cases}$$

В настоящее время известно большое число схем включения ОАД и КАД в однофазную сеть переменного тока. Наиболее полная классификация схем включения ОАД была составлена А. И. Адаменко. Ученый рассмотрел 94 схемы различных ОАД, включая схемы включения трехфазных асинхронных двигателей в однофазную сеть, разделив их на 38 групп, а так же привел некоторые технико-экономические показатели отдельных схем и типов ОАД. Необходимо подчеркнуть, что схемы включения ОАД и КАД продолжают совершенствоваться, появляются все новые и новые схемы, но при этом разработка и создание схем остается актуальной задачей. В последнее время в КАД широкое применение находит автоматическое регулирование фазосдвигающих сопротивлений, а также использование нелинейных конденсаторов, насыщающихся трансформаторов.

В современной технической литературе математические модели различных схем

включения КАД практически не встречаются, за исключением моделей наиболее распространенных схем [2]. При этом в качестве нерегулируемых фазосдвигающих элементов чаще всего используются ёмкости и активные сопротивления. Применение активного сопротивления оправданно, так как для получения кругового вращающегося поля, особенно при пуске, даже для двигателей небольшой мощности (до 200 Вт) требуются конденсаторы значительных ёмкостей (до 50 мкФ, а иногда и более), а габариты конденсаторов переменного тока высоких напряжений велики, и могут по размерам превосходить сам двигатель. При этом следует учитывать и высокую стоимость таких конденсаторов.

Академик В.С. Кулебакин предложил ряд схем включения таких двигателей, которые отличаются от классической схемы, тем, что обмотка вспомогательной фазы шунтируется либо активным сопротивлением, либо ёмкостью, реже индуктивным сопротивлением.

Математическая модель КАД, включаемого по схеме Кулебакина, при шунтировании обмотки вспомогательной фазы активным сопротивлением $R_ш$, в системе координат α,β в относительных единицах, записанная через потокосцепления обмоток будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \dfrac{d\psi_a}{d\tau} = u \cdot cos(\tau + \varphi_0) - r_a \cdot i_a, \\ \dfrac{d\psi_в}{d\tau} = u \cdot cos(\tau + \varphi_0) - u_c - r_в \cdot i_в, \\ \dfrac{d\psi_{эα}}{d\tau} = \psi_{эβ} \cdot \omega - r_э \cdot i_{эα}, \\ \dfrac{d\psi_{эβ}}{d\tau} = -\psi_{эα} \cdot \omega - r_э \cdot i_{эβ}, \\ \dfrac{d\omega}{d\tau} = \dfrac{1}{H} \cdot (M - M_c), \\ \dfrac{du_c}{d\tau} = x_c \cdot \left[(1 + \dfrac{r_в}{R_ш}) \cdot i_в + \dfrac{u \cdot cos(\tau + \varphi_0) - u_c - r_в \cdot i_в}{R_ш} \right]. \end{cases}$$

Если же в качестве шунта используется конденсатор с ёмкостным сопротивлением $x_{сш}$, то данная система уравнений примет следующий вид:

$$\begin{cases} \dfrac{d\psi_a}{d\tau} = u \cdot cos(\tau + \varphi_0) - r_a \cdot i_a, \\ \dfrac{d\psi_в}{d\tau} = u \cdot cos(\tau + \varphi_0) - u_c - r_в \cdot i_в, \\ \dfrac{d\psi_{эα}}{d\tau} = \psi_{эβ} \cdot \omega - r_э \cdot i_{эα}, \\ \dfrac{d\psi_{эβ}}{d\tau} = -\psi_{эα} \cdot \omega - r_э \cdot i_{эβ}, \\ \dfrac{d\omega}{d\tau} = \dfrac{1}{H} \cdot (M - M_c), \\ \dfrac{du_c}{d\tau} = x_c \cdot (\dfrac{u_{сш}}{x_{сш}} + i_в), \\ \dfrac{du_{сш}}{d\tau} = u \cdot cos(\tau + \varphi_0) - u_c. \end{cases}$$

Рассмотрим схему включения КАД с двухфазными параллельно соединенными обмотками, где роль фазосдвигающего элемента, включенного в цепь вспомогательной обмотки, выполняет не рабочий конденсатор, а активное сопротивление R_P.

Система дифференциальных уравнений КАД для данной схемы включения в системе координат α,β в относительных единицах, записанная через потокосцепления после упрощения имеет вид.

$$
\begin{cases}
\dfrac{d\psi_a}{d\tau} = u_a \sin(\tau + \varphi_0) - r_a \left(\dfrac{x_m \psi_{э\alpha} - x_э \psi_a}{x_m^2 - x_э x_a} \right), \\
\dfrac{d\psi_в}{d\tau} = u_в \sin(\tau + \varphi_0) - (r_в + R_P) \left(\dfrac{x_m \psi_{э\beta} - x_э \psi_в}{x_m^2 - x_э x_в} \right), \\
\dfrac{d\psi_{э\alpha}}{d\tau} = \psi_{э\beta}\omega - r_э \left(\dfrac{x_m \psi_a - x_a \psi_{э\alpha}}{x_m^2 - x_э x_a} \right), \\
\dfrac{d\psi_{э\beta}}{d\tau} = -\psi_{э\alpha}\omega - r_э \left(\dfrac{x_m \psi_в - x_в \psi_{э\beta}}{x_m^2 - x_э x_в} \right), \\
\dfrac{d\omega}{d\tau} = \dfrac{1}{H}(M_{эм} - M_c),
\end{cases}
$$

При этом уравнение электромагнитного момента остается прежним и имеет такой же вид как и в математической модели классической схемы включения КАД, приведенной в [2].

В КАД обмотки статора можно соединять не только параллельно, но и последовательно. При этом одна из фаз шунтируется активным сопротивлением или конденсатором. Запишем системы дифференциальных уравнений КАД для схем включения, в которых обмотки статора соединены последовательно и одна из фаз шунтируется сопротивлением $R_ш$ или конденсатором с ёмкостным сопротивлением $x_{сш}$, в системе координат α, β.

$$
\begin{cases}
\dfrac{d\psi_a}{d\tau} = u \sin(\tau + \ _0) - r_a \left(\dfrac{x_m \psi_{э\alpha} - x_э \psi_a}{x_m^2 - x_э x_a} \right) - \\
- R_ш \left[\left(\dfrac{x_m \psi_{э\alpha} - x_э \psi_a}{x_m^2 - x_э x_a} \right) - \left(\dfrac{x_m \psi_{э\beta} - x_э \psi_в}{x_m^2 - x_э \cdot x_в} \right) \right], \\
\dfrac{d\psi_в}{d\tau} = u \sin(\tau + \ _0) - r_a \left(\dfrac{x_m \psi_{э\alpha} - x_э \psi_a}{x_m^2 - x_э x_a} \right) - r_в \left(\dfrac{x_m \psi_{э\beta} - x_э \psi_в}{x_m^2 - x_э x_в} \right) - \dfrac{d\psi_a}{d\tau}, \\
\dfrac{d\psi_{э\alpha}}{d\tau} = \psi_{э\beta}\omega - r_э \left(\dfrac{x_m \psi_a - x_a \psi_{э\alpha}}{x_m^2 - x_э x_a} \right), \\
\dfrac{d\psi_{э\beta}}{d\tau} = -\psi_{э\alpha}\omega - r_э \left(\dfrac{x_m \psi_в - x_в \psi_{э\beta}}{x_m^2 - x_э x_в} \right), \\
\dfrac{d\omega}{d\tau} = \dfrac{1}{H}(M_{эм} - M_c).
\end{cases}
$$

Следует отметить, в данной работе рассмотрены лишь некоторые схемы включения КАД, причем только с рабочими фазосдвигающими элементами.

Выводы

Применение математического моделирования на стадиях проектирования и изготовления макетных и опытных образцов позволяет разработчику уже на этих этапах рассматривать динамику электрической машины, оценивать её пусковые и эксплуатационные свойства, что значительно снижает затраты на макетное моделирование и сокращает скок разработки. Приведенные модели несимметричных ОАД и КАД служит для изучения и оптимизации сложных нелинейных процессов, исследование которых традиционными способами затруднено.

При математическом моделировании обычно принимают параметры, входящие в уравнения, постоянными. Такое упрощенное представление параметров при решении целого ряда задач нежелательно и может исказить результаты. Учёт изменения параметров с течением времени особенно важен, когда при переходных процессах скорость двигателя изменяется в широких пределах, что весьма характерно для ОАД и КАД в частности.

В течение переходного процесса картина электромагнитного поля не остается постоянной, а вместе с ней изменяются и значения параметров схемы замещения. В несимметричных ОАД и КАД малой мощности наибольшее влияние на изменение параметров оказывают насыщение магнитной цепи двигателя.

Насыщение магнитной цепи следует учитывать во всех типах несимметричных ОАД. Определение зависимостей изменения параметров несимметричных ОАД представляет собой достаточно трудоемкий процесс. Для нахождения таких зависимостей необходимо определить значения параметров в статических режимах работы. На этом этапе следует применять средства анализа электромагнитных полей.

При моделировании несимметричных ОАД магнитное поле можно рассчитывать в поперечном сечении. Исследуемый двигатель можно моделировать в режимах установившегося короткого замыкания, холостого хода и номинальном. Для расчета электромагнитного поля в этих режимах целесообразно использовать метод конечных элементов реализованный в универсальном конечно-элементном пакете ANSYS.

На основании полевых расчетов можно определить зависимости индуктивных параметров схемы замещения исследуемого типа несимметричного ОАД от времени в течение электромеханического переходного процесса. При этом следует руководствоваться гипотезой, которая получила экспериментальное подтверждение [2], что индуктивные параметры схемы замещения ОАД изменяются по экспоненциальной зависимости, в качестве показателя степени которой используется электромеханическая постоянная времени двигателя.

Определенные зависимости необходимо подставлять в математические модели различенных типов несимметричных ОАД и КАД, которые в свою очередь получают из математической модели ОАД с общей несимметрией статора.

Построенные таким образом математические модели несимметричных ОАД и КАД малой мощности, содержащие в себе решение электромагнитного поля, могут быть использованы специалистами в области электрических машин и инженерами-электриками при проектировании и расчетах таких двигателей. Это является с одной стороны существенным уточнением существующих математических моделей, базирующихся на схемах замещения, а с другой – органичным развитием последних.

Наилучшие результаты при проектировании даёт совместное применение математического моделирования и экспериментальных исследований опытных образцов ОАД.

Библиографический список

1. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / И.П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
2. Тонн Д. А. Квазиустановившиеся и переходные процессы несимметричных асинхронных двигателей, работающих от однофазной сети: Автореферат дис. канд. техн. наук [Текст] / Д. А. Тонн – Воронеж: ВГТУ, 2004. –17 с.

УДК 537.523; ГРНТИ 29.27.43

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕНТИЛЯТОРА КОРОННОГО РАЗРЯДА ПРИ ПИТАНИИ КОМБИНИРОВАННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Н. Верещагин, В. Васильев
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, vasilev_vv1988@mail.ru

Аннотация. В данной работе рассмотрена схема комбинированного питания для устройства, работающего на коронном разряде. Исследуются зависимости скорости электрического ветра от параметров питающего напряжения. Показано, что использование комбинированного питания позволяет повысить КПД.

Ключевые слова: коронный разряд, электрический ветер, электродная система

STUDY OF CORONA DISCHARGE BLOWER WHEN SUPPLYING THE COMBINED VOLTAGE

N. Vereshchagin, V. Vasilev
Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, vasilev_vv1988@mail.ru

Abstract. In this paper, the combined power for the device operating on the corona discharge. Investigated the dependence of the velocity of electric wind parameters of the supply voltage. It is shown that using the combined power allows gain in efficiency.

Keywords: corona discharge, electric wind, electrode system

1. Введение

Электрический ветер возникает при горении коронного разряда [1,2]. Одним из условий возникновения коронного разряда является резко неоднородное электрическое поле. Для этого коронирующий электрод делают с малым радиусом кривизны. При подаче высокого напряжения на коронирующий электрод начинается генерация ионов в области коронирующего электрода. Далее под действием электрического поля ионы ускоряются по направлению к осадительному электроду. Движущийся поток ионов сталкивается с нейтральными молекулами воздуха, придавая им направленное ускорение. Таким образом, возникает электрический ветер.

В настоящее время перспективными направлениями использования электрического ветра являются:

- охлаждение электронных компонентов [3,4];
- бесшумные вентиляторы [5];
- прокачка газа с обеспечением вакуумной чистоты [6,7];
- очистка и обеззараживание воздуха [5,8].

Одним из важных параметров для таких устройств является скорость воздушного потока. Целью данной работы является исследование способа увеличения скорости электрического ветра, за счет питания комбинированным напряжением.

2. Источник питания комбинированным напряжением и электродная система

Вентилятор коронного разряда состоит из высоковольтного источника питания и электродной системы. На рисунке 1 приведена схема источника для комбинированного питания постоянным и импульсным напряжением, где **ГВИ** – генератор высоковольтных импульсов, **ЭС** – электродная система, **ИПН** – источник постоянного напряжения, **Т1** – повышающий импульсный трансформатор, **kV** – киловольтметр С96, **μA** – миллиамперметр М2038.

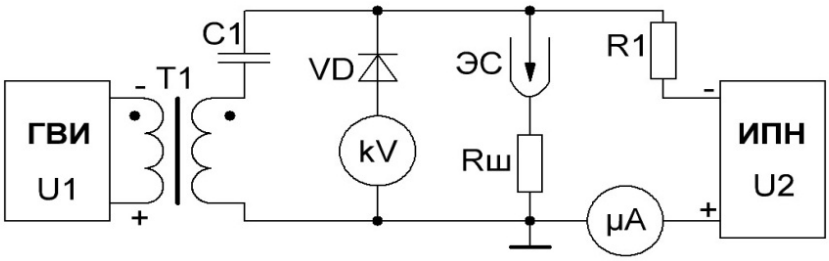


Рис. 1. Структурная схема источника комбинированного питания

Комбинированное напряжение – это такой вид напряжения, когда на постоянное напряжение накладывается импульсное. На рисунке 2 показана форма и параметры комбинированного напряжения.

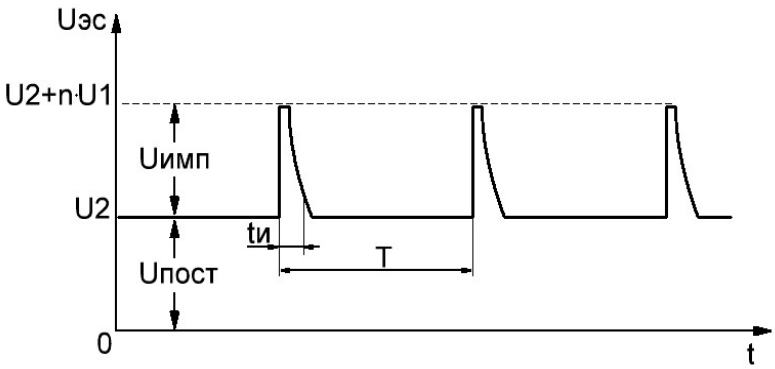


Рис. 2. Форма напряжения комбинированного источника питания

Конструкция электродной системы (рис. 3) состоит из коронирующего (1) и осадительных электродов (2,3). Коронирующий электрод изготовлен из пластины нержавеющей стали, одна сторона которой имеет зубья треугольной формы. Вершины зубьев имеют малый радиус кривизны и задают фиксированные точки зажигания разряда. Осадительные электроды, выполнены в виде трубок и расположены параллельно между собой на заданном расстоянии **h** и на расстоянии **d** от коронирующего электрода.

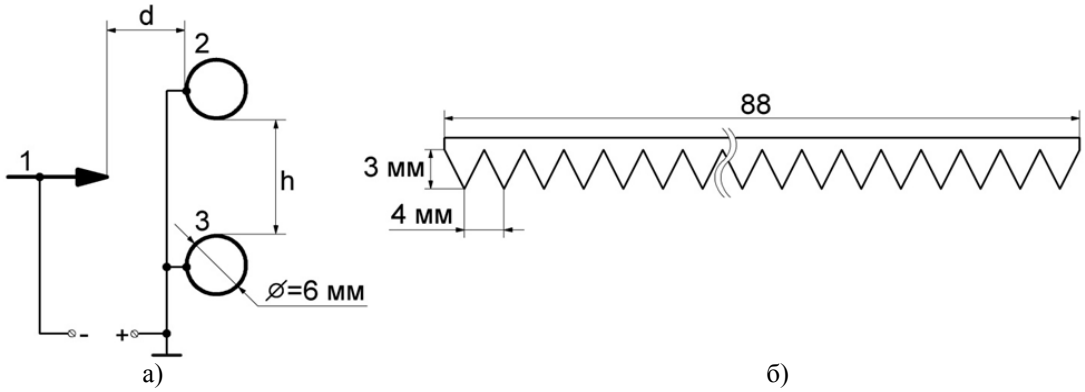


Рис. 3. Структурная схема электродной системы (а) и форма коронирующего электрода (б)

Устройство работает следующим образом. Постоянное напряжение, поступающее с **ИПН**, заряжает конденсатор **С1** до напряжения **U2**, которое прикладывается к электродной системе **ЭС**. При подаче импульса с **ГВИ** через первичную обмотку трансформатора **Т1** начинает протекать ток. Возникшее напряжение на вторичной обмотке имеет такую полярность, что складывается с напряжением на конденсаторе (рис. 2).

Наличие постоянного напряжения обеспечивает стационарное распределение электрического поля в газоразрядном промежутке **d**, за счет чего происходит перемещение образовавшихся ионов. Импульсное напряжение приводит к увеличению количества ионов и, вследствие малой длительности, не приводит к пробою газового промежутка.

За счет коротких импульсов напряжения ($t_u << T$) большой амплитуды происходит увеличение количества ионов, что приводит к увеличению работы, производимой полем по перемещению заряда: $W=q\cdot U$, где q – суммарный заряд ионов в промежутке между коронирующим и осадительными электродами; U – разность потенциалов газоразрядного промежутка **d**. Заряд однозарядных ионов зависит от количества ионов и находится по формуле: $q=e\cdot N$, где e – величина элементарного заряда; N – количество ионов. Ионы, ускоренные в электрическом поле, сталкиваясь с нейтральными молекулами и атомами воздуха, передают им свою кинетическую энергию. Таким образом, чем больше заряд, тем большую работу совершает поле и тем больше энергии передается нейтральным молекулам и атомам воздуха и тем больше скорости электрического ветра.

3. Экспериментальные исследования

В экспериментах исследовалась работа устройства на отрицательном коронном разряде в атмосферном воздухе. Исследования проводились для различных величин постоянного напряжения от -5 до -17 кВ и при различных амплитудах импульсного напряжения от 0 до -5 кВ.

Проведенные эксперименты показали, что скорость электрического ветра не изменяется при увеличении длительности импульсного напряжения в диапазоне от 250 нс до 2 мкс, возрастает только потребляемая мощность. Измерение длительности импульса проводилось по уровню 0,5. Минимальная длительность была ограничена возможностями импульсного генератора.

Было установлено, что увеличение скорости воздушного потока происходит при увеличении частоты следование импульсов в диапазоне от 0 до 30 кГц (рис. 4). При частоте импульсов напряжения более 30 кГц происходил рост потребляемой мощности, а скорость воздушного потока оставалась неизменной, что приводило к снижению КПД устройства.

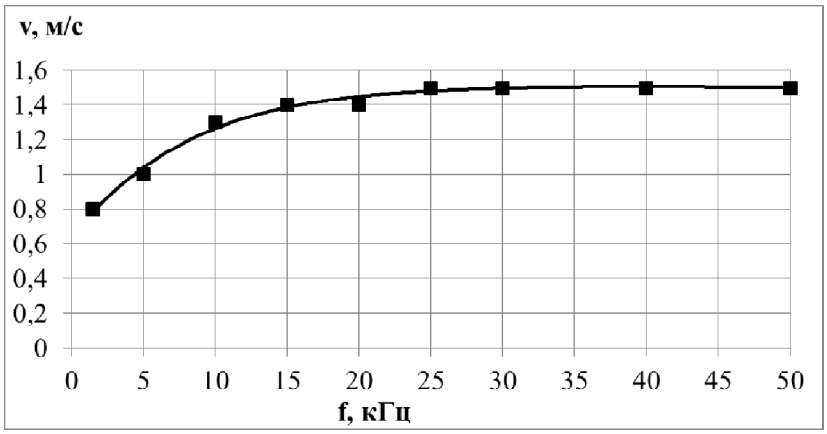


Рис. 4. Экспериментальная зависимость скорости электрического ветра от частоты импульсного напряжения

При увеличении амплитуды импульсного напряжения происходит линейный рост скорости воздушного потока (рис. 5) при различных величинах постоянного напряжения. Как видно из графиков наиболее эффективно комбинированное напряжение при величине постоянного напряжения близкого к зажиганию разряда. В данной установке коронный разряд зажигался при -6.5 кВ. С увеличением уровня постоянного напряжения, прибавка в скорости от импульсного напряжения становится меньше. Максимальная амплитуда импульсного напряжения ограничена возможностями генератора.

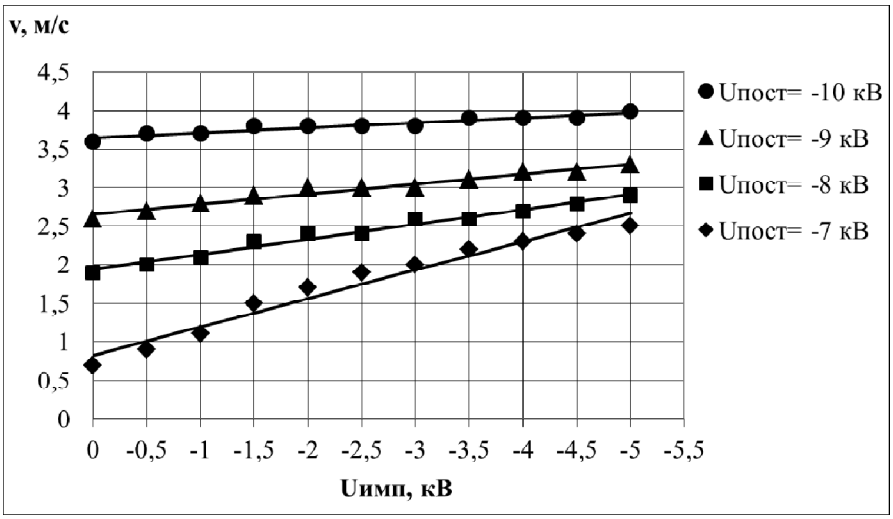


Рис. 5. Экспериментальные зависимости скорости электрического ветра от амплитуды импульсного напряжения при различных величинах постоянного напряжения

На рисунке 6 показаны зависимости КПД от скорости воздушного потока для различных видов питающего напряжения: ● – только постоянное напряжение, ■ – комбинированное при величине постоянного напряжения -10 кВ; ▲ – комбинированное при величине постоянного напряжения -15 кВ. Скорость воздушного потока в первом случае увеличивается за счет увеличения постоянного напряжения. В случаях с комбинированным питанием – устанавливалось значение постоянного напряжения -10 кВ и -15 кВ и скорость увеличивалась за счет увеличения амплитуды импульсного напряжения при фиксированной частоте 15 кГц и длительности импульса 250 нс. КПД определялось как отношение энергии воздушного потока к энергии, вводимой в коронный разряд. Из рисунка 6 видно, что КПД больше у устройства питающегося комбинированным напряжением и увеличивается с увеличением амплитуды импульсного напряжения.

Выводы

Проведенные исследования комбинированного питания при работе электродной системы на отрицательном коронном разряде показали, что изменение длительность импульса в диапазоне 0,25÷2 мкс не приводит к изменению скорости электрического ветра; скорость электрического ветра увеличивается с ростом частоты импульсов до 30 кГц; с увеличением амплитуды импульсного напряжения увеличивается скорость потока и увеличивается КПД, по сравнению с устройствами, питающимся только постоянным напряжением.

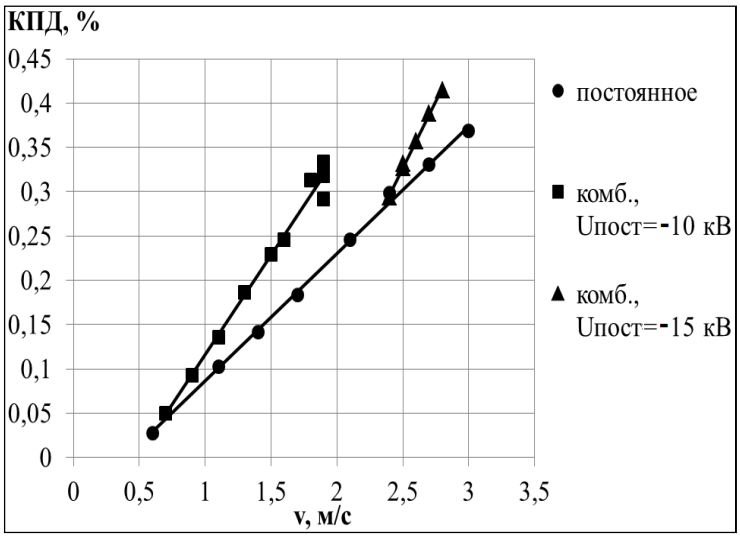


Рис. 6. Экспериментальные зависимости КПД от вида питающего напряжения

Кроме того, комбинированное питание позволяет увеличить надежность устройства за счет того, что отсутствуют искровые пробои газоразрядного промежутка электродной системы при изменении параметров внешней среды: влажность, давление, запыленность, наличие аэрозольных частиц. Вследствие малой длительности импульсов напряжения – пробой промежутка не наступает.

Библиографический список

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда: Учеб. Руководство. – М.: Наука, 1987. 592 с.
2. Верещагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. – М.: Энергоатомиздат, 1985. С. 160.
3. Patent US 8466624 B2. Electrohydrodynamic fluid accelerator device with collector electrode exhibiting curved leading edge profile.
4. Patent US8467168 B2. Electronic system changeable to accommodate an EHD air mover or mechanical air mover.
5. Криштафович И.А., Криштафович Ю.А. Ионный ветер и его применение.
URL: http://tersus-i.ru/file/biblio/Ionnyj-veter-i-ego-primenenija.pdf. (дата обращения 15.02.2017).
6. Козлов Б.А., Соловьев В.И. Исследование электрического ветра в электродных системах с коронирующими остриями. ЖТФ. Т. 77. Вып. 7. 2007. С. 70-76.
7. Патент РФ № 2068213 от 30.03.93. Козлов Б.А., Соловьев В.И., Федотов А.А. Импульсный газовый лазер.
8. Токарев А.В. Коронный разряд и его применение. Бишкек: КРСУ. 2009. 138 с.

УДК 536.2; ГРНТИ 28.17

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В НЕГЕРМЕТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОННЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМАХ

А.И. Борисова, В.Л. Бурковский
Воронежский государственный технический университет,
Россия, Воронеж, alinka_borisova93@mail.ru, bvl@vorstu.ru

Аннотация. В докладе рассматриваются специфические особенности теплообмена в негерметичных электромеханотронных исполнительных механизмах под агрессию глубокого вакуума и невесомости. Показана пренебрежительная малость конвективной составляющей теплопроводности с преимуществом «кондуктивно-радиационного» охлаждения интегрированных механотронных конструкций.
Ключевые слова: теплообмен, электромеханотронные исполнительные механизмы, глубокий вакуум, теплопроводность.

THE MODEL OF THE HEAT EXCHANGE PROCESS IN LEAKY ELECTROMECHATRONIC EXECUTING MECHANISMS

A. I. Borisova, V. L. Burkovsky
Voronezh state technical University,
Russia, Voronezh, alinka borisova93@mail.ru, bvl@vorstu.ru

Abstract. In the report the specific features of heat transfer in leaky electromechatronic executive mechanisms in terms of aggression of high vacuum and weightlessness are considered. There is a dismissive smallness of the convective component of the thermal conductivity with the advantage of "conductive-radiation" cooling of integrated vacuum tube structures.
Keywords: heat electromechatronic executing mechanisms, high vacuum, thermal conductivity.

1. Введение

Экономика перспективного космоса предусматривает системно активный рост долговечности базовых электротехнических комплексов: исполнительных механизмов его рабочих аппаратов (КА) негерметичного исполнения (КАН) с функциональной наращиваемостью и критической стойкостью при разумной конструктивной интеграции электромеханотронных движителей (ЭМТД) в условиях глубокого физического ***вакуума,*** невесомости, солнечных излучений, гравитации и магнитных полей земли с учетом зависимостей [1].

Актуальность исследований, характеризующих данное научно-техническое направление, производственно-технологические аспекты создания такой аппаратуры нового поколения, в факторах совместимости противоположностей «вакуум-ресурс- цифро функция» при условиях переменных внешних и внутренних тепловых потоков актуализирует задачу теплорациональных обмена и защиты совмещенных ЭМТД-конструкций наиболее эффективным методом математического моделирования при описании процесса теплопередачи по структурным контурам проблемного поля функциональной напряженности высокоресурсных вакуумных микроконтроллерных бесконтактных приводов (МК-БЭДПТ-ВВ) [2].

Эффективность математического моделирования тепловых параметров, часто связанное с неопределенностью физических процессов, требует и совокупности тепловых экспериментов на имитационных моделях. При этом в процессе теплообмена ЭМТД актуальны все виды теплозащит – кондуктивный, конвективный и излучением, которые обеспечивают отвод тепла до 30% потребляемой мощности МК-БЭДПТ-ВВ (при КПД≤70%). В тоже время электромеханический узел ЭМТ, являясь основным ядром механической активности систем КАН, локально через несущий корпус интегрируется с его поверхностью и определяет одну из составляющих циклограммы общего тепловыделения за контролируемый период с базовым уровнем ***кондуктивного*** теплообмена МК-БЭДПТ-ВВ через температуры корпусу КА в точке установки. [3] При этом, тепловой поток «теплопроводности» описывается уравнением:

$$q_{ТП} = \frac{Q_{ТП}}{S_{ТП}} = \frac{\lambda_{ТП}}{b}(Q_1 - Q_2)\text{, где:}$$

$Q_{ТП}$ и $S_{ТП}$ – количество тепла и теплопроводящая поверхность, переносимые тепловой поток (ТП);

$\lambda_{ТП}$ и b – коэффициент теплопроводности и толщина стенки материала характеризующие его свойства;

Q_1 и Q_2 – температура по обеим сторонам стенок.

«Конвекция» характеризуется соотношением:

$$q_k = \frac{Q_k}{S_k} = \alpha_k (Q_3 - Q_4)$$, где:

$\alpha_к$ – коэффициент теплообмена при температуре по обеим сторонам.

Оценка величины энергопоступлений от ЭМТ определится соотношением $Q_{ПОС} = K\sum^{n} N_1(1-h_i)$, где К – коэффициент электромагнитного единства; N – магнитная составляющая.

Для i-го нелокализованного источника тепла дифуравнение среднеинтегральной температуры имеет вид:

$$[c \cdot m]_{ЭМТ} \frac{\partial T_{ЭМТ}}{\partial t} = Q_{ЭМТ} + [\alpha \cdot F]_{ЭМТ}[T_{ЭМТ} - T_K],$$ где

с и m – удельные теплоемкость и масса составляющих ЭМТ;

α и F – коэффициент теплопередачи от составляющих ЭМТ, К;

$T_К$ и $T_{ЭМТ}$ – температура на корпусе КА и ЭМТ.

Последнее произведение соотношения определяет суммарное количество тепла, передаваемое излучением сверх температуры корпуса. [4]

2. Анализ современных состояний проблемы

В инженерной практике улучшение условий отвода тепла при высоком эксплуатационном вакууме достигается увеличением площади и качества отработки излучающей радиационной поверхности (с покрытиями), повышением теплопроводности конструкционных материалов и созданием дополнительных теплоотводов, имея в виду, что уже при давлении ниже 10^{-8} кГс/см^2, конвективная составляющая теплопроводности окружающей среды становится пренебрежительно малой с преимуществом «радиационно-излучающего» охлаждения. При анализе такого ЭМТ распределение тепловой мощности задается осредненным по поверхности, но с последующим учетом локальностей тепловыделения его составляющих в местах крепления. [5] В ходе математического моделирования производится графический вывод во времени величин внутренних тепловых потоков и развертке всей поверхности ЭМТ с цветом отображения при формировании расчетных методах и оптимизации тепловых режимов по факторам совмещения сроков службы и устойчивости к «высокому» вакууму при учете методологических подходов диагностики и ускоренных ресурсных испытаний в подтверждение качества сверхдолговечных МК-БЭДПТ-ВВ. Собирательный образ рациональны,(в виде проблемного поля), в конструктиве новой вариации единого моноблока представлен рисунком 1.

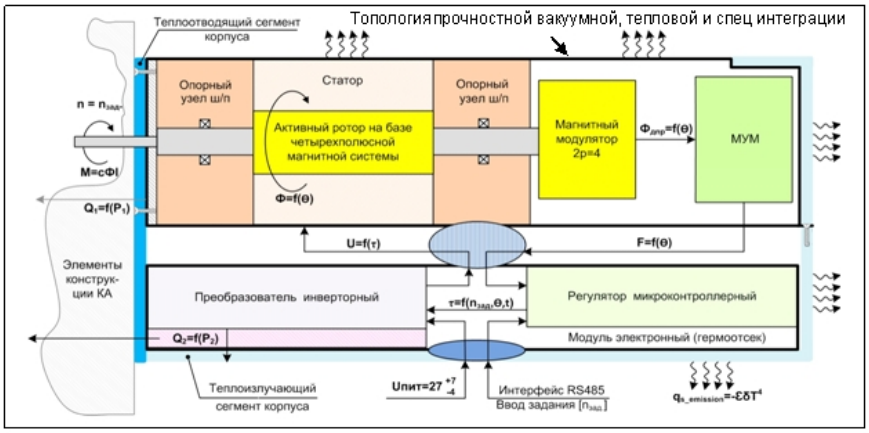


Рис. 1. Структура проблемного поля функциональной напряженности МК-БЭДПТ-ВВ
Примечание: МУМ-магнитоуправляемые микросхемы;
МК-БЭДПТ-ВВ – бесконтактный электродвигатель постоянного тока

3. Конструктивно-технологические аспекты консолидируются условием, что опорная кинематика МК-БЭДПТ-ВВ для условий открытого космоса с вакуумом и солнечным излучением, ограниченной тепловой передачей, требует более совершенных конструкций в контексте наиболее сложных разделов теории «прочность-трение» с компромиссом по категориям охлаждения, износостойкости, смазки, прочности вибросвойств и др. В этом плане по исходному материалу приходится ориентироваться на научно-справочную литературу девяностых годов, где отражены основополагающие сведения о способах обеспечения ресурсной характеристики, долговечности, электромеханического ядра на шарикоподшипниковых опорах с твердыми смазывающими конструкциями, для экспериментальных эксплуатационных условий, что подтверждается штатной эксплуатацией аналогов в течение более 20000 часов (в вакууме с солнечной радиацией). [6]

Однако такая модель предполагает совмещение всех дестабилизирующих факторов, влияющих на выбор конструктивных мер обеспечения надежности и, прежде всего (кроме теплозащиты), влаго и трибо стойкости, механической и радиационной прочности, долговечности в условиях солнечных излучений и магнитных полей земли.

4. Заключение

Высокоресурсные МК-БЭДПТ-ВВ со встроенным контроллером, обладая большим сроком службы и стойкостью в агрессивных условиях, электромагнитной совместимостью, возможностями эффективного управления являются наилучшим решением для космического применения. Поэтому задача анализа и синтеза технического состояния дорогостоящих механотронных систем такого класса актуальны, особенно в области тепловой и спецнапряженностей.

Библиографический список

1. И.В. Мещеряков. В мире космонавтики [Текст] / И.В. Мещеряков // - Н. Новгород. - 1996.
2. С.В. Цаплин, С.А. Боличеев, А.Е. Романов. Основы теплообмена КА [Текст] / С.В. Цаплин, С.А. Боличеев, А.Е. Романов // Учебное пособие. – 2013.
3. К.Ф. Голиковская. Математическое моделирование тепловых потоков космических аппаратов [Текст] / К.Ф. Голиковская // Вестник Сибирского Государственного аэрокосмического университета им. Решетнева. – 2005.- Выпуск №3.
4. Е.Н. Васильев. Математическое моделирование и оптимизация теплообмена в космических аппаратах [Текст] / Е.Н. Васильев // ИВТ СО РАН. - 2009.- Выпуск №6.- Том 14.
5. И.В. Белокрылов. Основы вакуумной техники, теплоты в вакууме [Текст] / И.В. Белокрылов // М: Вактрон.- Москва. - 2015 г.
6. А.И. Борисова, В.Л. Бурковский. Анализ плотности температурных режимов механотронной аппаратуры в негерметизированных электротехнических комплексах [Текст] / А.И. Борисова, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2016.-Выпуск №6.- Том 12.

УДК 53.086; ГРНТИ 47.09.48

ТОКОСЪЕМНЫЕ ЩЕТКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ДОБАВЛЕНИЕМ УЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК. СПОСОБ ИХ ПРОИЗВОДСТВА И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

А.А. Терехова, И.А. Дьяков
Тамбовский государственный технический университет,
Россия, Тамбовская область, г.Тамбов, terehova-95@rambler.ru, nanogalvanotech@mail.ru

Аннотация. В данной работе описан способ изготовления токосъемных щеток электродвигателей с добавление углеродных нанотрубок, их основные характеристики и приемущества их использования.

Ключевые слова: токосъемные щетки, углеродные нанотрубки.

TOKOSJEMNY BRUSHES OF ELECTRIC MOTORS WITH ADDITION ULERODNY NANOTUBES. METHOD OF THEIR PRODUCTION AND MAIN CHARACTERISTICS.

A.A. Terekhova, I. A. Dyakov
Tambov State Technical University
Russia, Tambov region, Tambov, terehova-95@rambler.ru, nanogalvanotech@mail.ru

Abstract. In this paper the way of production the tokosjemnykh of brushes of electric motors about addition of carbon nanotubes, their main characteristics and advantages of their use is described.
Keywords: tokosjemny brushes, carbon nanotubes.

1. Введение

Щетки применяюся в двигателях для электрической связи подвижной и неподвижной частей электродвигателей, практически во всех бытовых электроприборах, электроинструментах, а также во всех областях промышленности. Токосъемные щетки – одна из наиболее часто выходящих из строя частей электродвигателя, замена которой приводит к простою производства, а следовательно к экономическим потерям.

Таким образом, актуальна задача повышения износотойкости щеток электродвигателей и увеличения времени их работы. Предлагается инновационны подход решения задачи повышения износостойкости за счет добавления в исходное сырьё углеродных нанотрубок, обладающих высокими прочностными механическими и электрическими свойствами.

2. Характерные свойства углеродных нанотрубок

Углеродные нанотрубки – это протяженные цилиндрические свернутые графитовые полоски толщиной до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров, имеющие углеродистую каркасную структуру. Под данной структурой подразумевают большие молекулы, связанные между собой только атомами углерода. На концах нанотрубок обычно образуются полусферические головки[1].

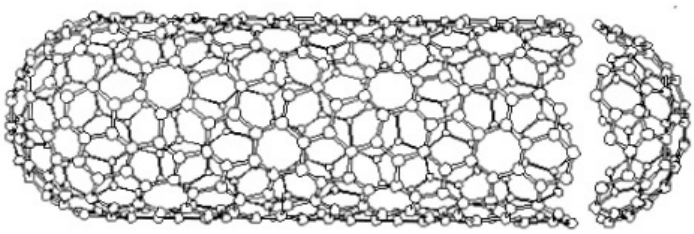


Рис. 1. Идеализированная модель однослойной углеродной нанотрубки [1]

Многократные эксперименты, проведенные разными учеными, показывают что углеродные нанотрубки являются наиболее прочным и жестким из всех известных материалов - материалом с рекордно высокими значениями пределом прочности на растяжение (~60 ГПа) и модуля Юнга (≈ 1 ТПа). Это связано с совершенством структуры и сильной химической sp^2-связью между атомами углерода, которые составляют нанотрубку[3].

Также нанотрубки также являются хорошими теплопроводниками вдоль трубки, проявляя свойства, так называемой, беспрепятственной проводимости или сверхпроводимости[3].

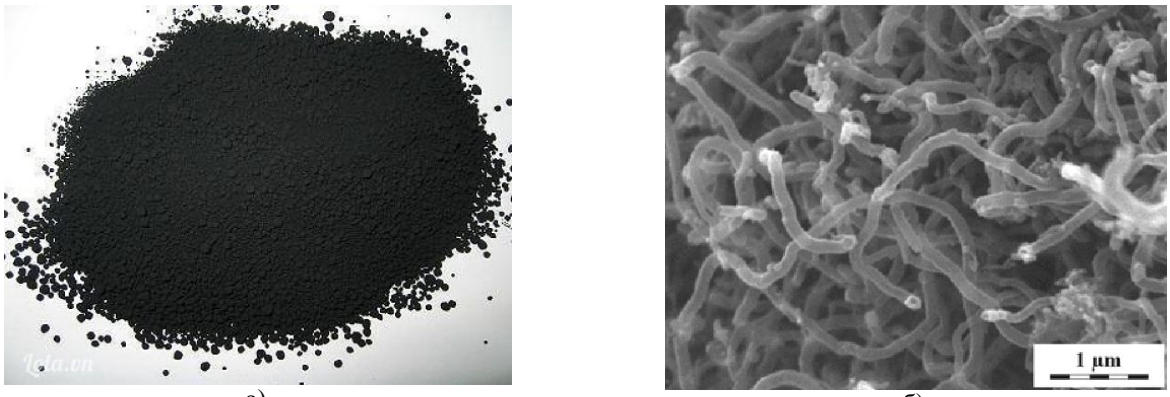
Широкое использование в углеродных нанотрубок в электротехнике возможно благодаря тому, что они могут пропускать токи плотностью выше, чем наиболее проводящие металлы, такие как, например, медь. Так однослойные нанотрубки пропускают токи плотностью до 109 А/см^2, а многослойные – до 100 мкА/см^2, а медь при таких значениях плотности тока плавится. Кроме того, при сопротивлении, сопоставимом с медью, углеродные нанотрубки в четыре раза легче.

Также углеродные нанотрубки превосходят медь по такому показателю, как коэффициент теплопроводности вдоль оси. Для меди он равен 400 Вт/м·К, для нанотрубок 500-5500 Вт/м·К [2].

3. Способ изготовления токосъемных щеток электродвигателей с добавлением углеродных нанотрубок

Способ производства щеток для электрических машин заключается в том, что смешивают отдельные порошки какса или сажи, которые, в свою очередь, яаляется хорошим наполнитлем, что повышает плотность и твердость щетки. К ним добавляются связующие вещества, наприме, смола или пек. К этой смеси добавляется порошок углеродныйх нанотрубок (рис. 2а,б). Из получнной смеси под высокин давлением, порядка 100 - 140МПа, при помощи специальныхпресс-форм формуются щетки. Увеличении давления свыше 140МПа не

приводит к увеличению прочности и износостойкости щеток, а при более низком давлении готовы щетки имеют сравнительно невысокую прочность. При необходимоти в специальный канал пресс-формы вводится токопровод.



а) б)

Рис. 2. Порошок углеродных нанотрубок [3]
а) вид готового к применению порошка; б) вид под микроскопом

Далее электорощетки подвергаются специальной термической обработке в специализированных печах под высокой температурой (до 2500 С). Обжиг щеток с углеродными нанотрубками производится в течении 5-15 минут, что зависит от объема внесенного порошка углеродных нанотрубок и способом нагрева. В процессе обжига связующие вещества коксуются; при этом спекаются отдельные частицы углеродистого материала.

Щетки, изготовленный таким способом, отличаются высокой шлифиещей мпособностью, высокой теплопроводностью, возмжостью проводить токи большей плотности, обладают большим пределом прочности и высокой износостойкостью.

Полученные характеристики щеток препятствуют сильному или неравномерному износу щеток, что является наиболее частой причиной выхода электродвигателей из строя [4].

4. Приемущества использования токосъемных щеток электродвигателей с добавлением углеродных нанотрубок

Добавление углеродных нанотрубок непосредственно в тело токосъемной щетки позволит сделать ее более устойчивой к воздействию вибрации и пыли, протеканию тока большой плотности, и, соответственно, разрушениям вызванными данными факторами.

Наиболее характерные разрушения щеток: «ветвистость» в результате воздействия пыли (рис. 3); образование башмака (рис. 4); трещина в результате колебаний (рис. 5); выработка от нажимной детали с верхнего торца (в том числе с воздействием тока искрения) (рис. 6) [5].

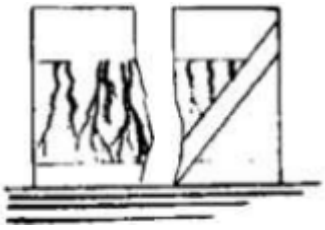


Рис. 3. «Ветвистость» щетки в результате воздействия пыли [5]

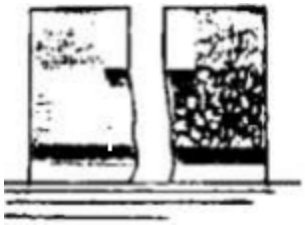


Рис. 4. Образование «башмака» в теле щетки [5]

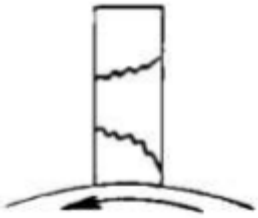


Рис. 5. Трещина щетки в результате колебаний [5]

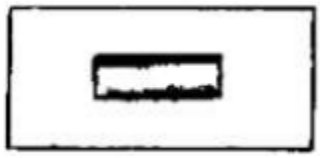


Рис. 6. Выработка от нажимной детали с верхнего торца [5]

Примение наномодифицированных щеток по сревнениию с наиболее распространенными угольными щетками существенно увеличит время наработки электродвигателя, что выгодно с технико-экономической точки зрения.

5. Выводы

В настоящее время благодаря своим свойствам углеродные нанотрубки являются одним из наиболее перспективных материалов, применяемых во многих отраслях промышленности. Применение нанотрубок в электротехнике обусловлено необходимостью создания нового материала, благодаря свойствам которого появится возможность уменьшить затраты на производство и эксплуатация электрооборудования. Использование углеродных нанотрубок в производстве токосъемных щеток электрических двигателей позволит избежать их преждевременного износа, тем самым продлить время работы электродвигателя без ремонта.

Библиографический список

1. Елецкий А. В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // Успехи физических наук – 2002. – Т. 172, № 4. – С. 401–437.
2. Пул Ч., ОуэнсФ.Нанотехнолигии. – М.:Техносфера, 2005. – 336с.
3. Полимер-наноуглеродные композиты для космических технологий.Часть 1. Синтез и свойства наноуглеродных структур : учебное пособие / А. В. Макунин, Н. Г. Чеченин. — М. : «Университетская книга»,2011. — 150 с.
4. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Том 1 [Электронный ресурс]: учебник для вузов/ Иванов-Смоленский А.В.— Электрон. текстовые данные.— М.: Издательский дом МЭИ, 2006.— 653 с.— Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/33203.— ЭБС «IPRbooks»
5. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин [Электронный ресурс]: учебное пособие для вузов/ Кузнецов Н.Л.— Электрон. текстовые данные.— М.: Издательский дом МЭИ, 2006.— 431 с.— Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/33148.— ЭБС «IPRbooks»

УДК 621.3.014.12

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ ПРОВОДНИКОВ В ОБЛАСТИ ПОМЕХОПОДАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ОТ ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

С.Ю. Буваков, Д.В .Суворов, Г.П. Гололобов, Д.Ю. Тарабрин

Рязанский государственный радиотехнический университет,

Россия, Рязань, LiLbuv@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты численного расчета частотной зависимости электрического сопротивления проводников круглого сечения с двухслойной структурой Cu-NiCr. Разработана физико-математическая модель процесса токопрохождения через композитную аксиально-симметричную структуру, имеющую области с высокой и низкой удельными проводимостями. Представлены данные о влиянии геометрических параметров структуры композитного проводника на частотную зависимость электрического сопротивления.

Ключевые слова: скин-эффект, резистивные покрытия, композитные проводники, силовая электроника, электрическая проводимость.

THE USE OF COMPOSITE CONDUCTORS IN THE INTERFERENCE SUPPRESSION AND SURGE PROTECTION

S. Buvakov, D. Suvorov, G. Gololobov, D. Tarabrin
Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, LiLbuv@mail.ru

Abstract. In this paper the results of numerical calculation of the frequency dependence of the electrical resistance of circular cross-section of conductors with a two-layer structure of Cu-NiCr are presented. Physical and mathematical model of current flow through the composite axial-symmetric structure having regions of high (core) and low (shell) conductivities are developed. The data on the influence of the geometric parameters of the composite conductor structure on the frequency dependence of the electrical resistance are presented.

Keywords: skin effect, resistive coatings, composite conductors, power electronics, and an insulating electron-conductivity.

1. Введение

В настоящее время в связи с интенсивным развитием импульсной техники, высокочастотной силовой электроники актуальным является исследование систем и устройств, имеющих сильную зависимость активного сопротивления от частоты [1].

Известно явление скин-эффекта, проявляющееся в уменьшении проводимости единичного проводника на высоких частотах [2]. Для большинства задач радиотехники явление скин-эффекта нежелательно, однако перспективным является его использование для управляемой модуляции электрического сопротивления на высоких частотах. Перспективным решением в данной области является использование композитных проводников, имеющих покрытие из металлов и сплавов с существенно большим электрическим сопротивлением, путем изменения свойств и структуры проводника [3, 4].

В композитной структуре проводника (рис. 1) с ростом частоты, вследствие скин-эффекта, электрический ток оттесняется из сердцевины с низким удельным электрическим сопротивлением в область покрытия с большим значением электрического сопротивления. При этом с ростом частоты сопротивление композитного проводника будет резко возрастать в области высоких частот, поскольку основная часть тока будет протекать вблизи поверхности композитного проводника через материал с высоким удельным сопротивлением. Для низких частот и постоянного тока электрическое сопротивление проводника будет определяться сопротивлением сердцевины с низким удельным сопротивлением.

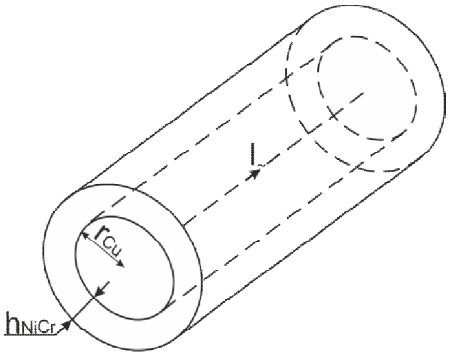


Рис. 1. Геометрия поперечного сечения композитного проводника

В опубликованных работах [3, 4] дано качественное описание конструкции кабелей резисторов имеющих композитную структуру, принцип работы которых основан на основе эффекта резкого увеличения активного сопротивления с ростом частоты. Однако количественные данные о влиянии параметров геометрической структуры проводника (толщины слоев) на частотную зависимость активного сопротивления отсутствуют.

Целью данной работы является математическое моделирование прохождения переменного электрического тока через композитную аксиально-симметричную структуру, имеющую области с высокой (сердцевина) и низкой (оболочка) удельными проводимостями

и получение зависимостей электрического сопротивления от частоты при различных параметрах структуры проводника.

2. Условия математического моделирования

Объектом исследований в настоящей работе являются единичный проводник круглого сечения состоящий из двух проводящих частей: проводника с низким удельным электрическим сопротивлением (медь (Cu) – 0,01724 Ом·мм^2/м) и покрытия проводника, состоящего из материала, обладающего более высоким удельным электрическим сопротивлением (сплав никель-хром (NiCr) – 1,4 Ом·мм^2/м). Выбор материалов обусловлен характеристиками электрической проводимости (разница электрических проводимостей более чем в 100 раз) и стойкости к воздействию высокой температуры, а также возможностью практического использования.

Расчет влияния скин-эффекта на электрическое сопротивление на различных частотах осуществлялся методом конечных элементов с использованием специализированного программного обеспечения COMSOL Multiphisics [5, 6]. В расчете учитываются основные электродинамические процессы характеризующие скин-эффект, описываемые уравнениями Максвелла [8] для квазистационарного электромагнитного поля.

Результатами моделирования являются:

- распределение плотности электрического тока по сечению композитного проводника;
- частотная зависимость электрического сопротивления композитного проводника.

3. Результаты численного моделирования

Основным результатом моделирования является распределение плотности переменного тока по сечению композитного проводника на различных частотах (рис. 2). На низких частотах основной ток протекает в области медной проводящей сердцевины (рис. 2 а, б), а на высоких частотах ток смещается в область проводника с низким значением проводимости (рис. 2 в, г).

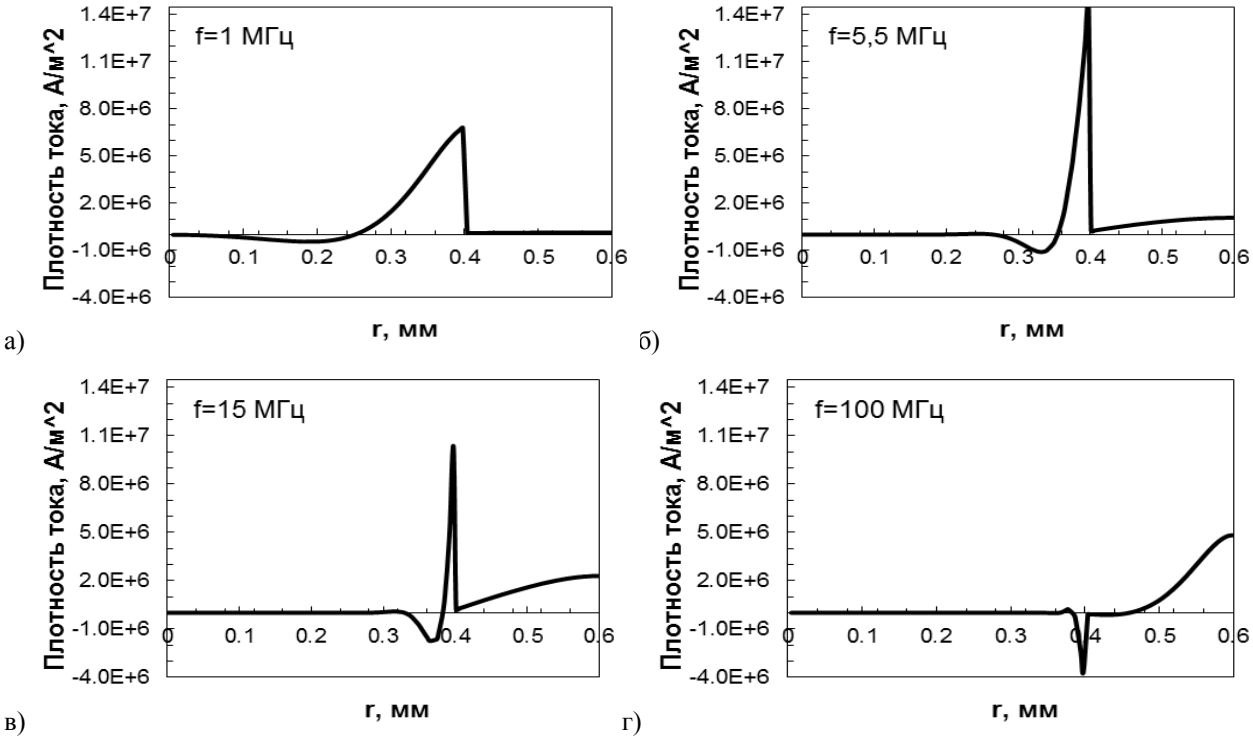
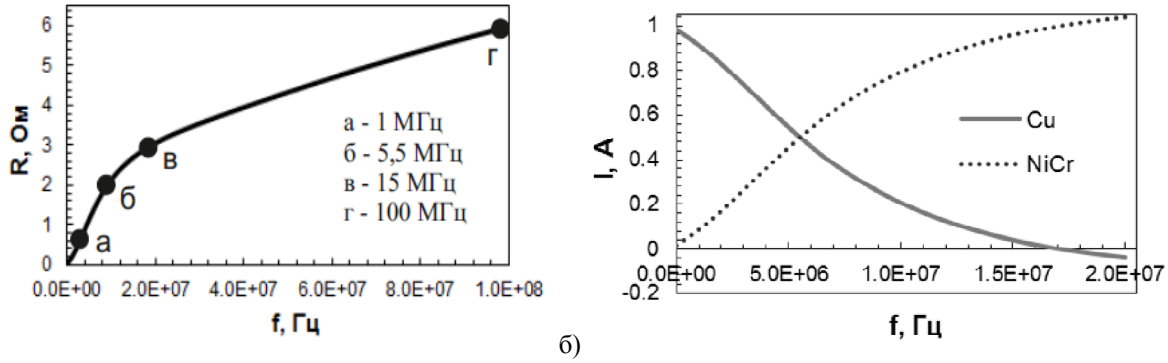


Рис. 2. Распределение плотности переменного тока вдоль радиуса r проводника для различных частот переменного тока: а) f = 1 МГц; б) f = 5,5 МГц; в) f = 15 МГц; г) f = 100 МГц.

Стоит заметить, что ток может принимать отрицательное значение, которое увеличивается вблизи границы раздела двух сред (Cu-NiCr), но уменьшается толщина слоя, в котором характерно это увеличение. Причиной этого является постоянное нестабильное изменение вихревого электрического поля ***E*** во времени, созданного магнитным полем с индукцией ***B***, которое зависит от изменения частоты переменного тока ***I*** [2].



а) б)

Рис. 3. Зависимость электрического сопротивления (а) и зависимость интегральных составляющих тока протекающих в областях Cu и NiCr (б) от частоты (радиус проводника rcond = 0,4 мм и толщины покрытия hres = 0,2 мм)

Выделенные точки на рисунке 3а соответствуют частотным распределениям плотности тока (рис. 2), а точка пересечения двух кривых на рисунке 3б соответствует точке «б» (рис. 3а).

Зависимость электрического сопротивления от частоты (рис. 3а) имеет три характерные области [3]:

1) *Область быстрого увеличения сопротивления проводника (до 5,5 МГц)*. Резкий рост сопротивления обусловлен оттеснением тока к границе раздела двух сред (Cu-NiCr). В данной области ток протекает преимущественно в приповерхностном слое проводящей сердцевины и имеет высокое значение плотности.
2) *Граничная область (5,5-15 МГц)*, в которой происходит переход тока из проводящей части композитного проводника в резистивную часть. Частота электрического тока f_s, при которой происходит резкий перегиб зависимости сопротивления от частоты можно условно назвать «частотой перехода» [7]. Частота перехода соответствует значению точки «б» на рисунке 3а. и значению точки пересечения кривых интегральных составляющих тока протекающих в областях Cu и NiCr на рисунке 3б.
3) *Область медленного роста электрического сопротивления (свыше 15 МГц)*, в которой основная часть электрического тока протекает в области с высоким удельным сопротивлением. Глубина скин-слоя увеличивается за счёт меньшего значения проводимости NiCr.

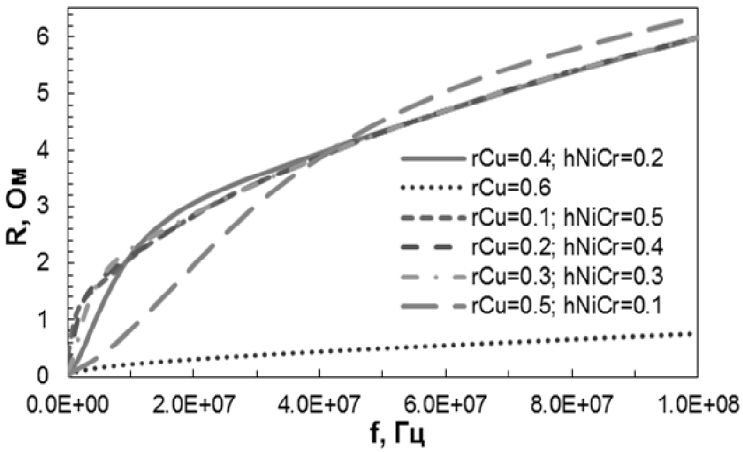


Рис. 4. Зависимости электрического сопротивления проводников от частоты переменного тока при различных отношениях толщины покрытия к радиусу проводника rcond/rres – 0,2; 0,5; 1; 2; 5 при условии постоянства внешнего диаметра 1,2 мм

Расчеты показывают, что с увеличением толщины покрытия и уменьшением радиуса проводящей сердцевины частота перехода уменьшается (рис. 4). Это обусловлено оттеснением тока в область с малой электропроводностью уже при низких частотах.

Выводы

Проведено теоретическое исследование электрических свойств композитного проводника, состоящего из медной сердцевины и нихромового покрытия. Разработана физико-математическая модель процесса токопрохождения через композитную структуру имеющую области с высокой и низкой удельными проводимостями. В процессе численного моделирования было выявлено следующее:

- композитный проводник круглого сечения с резистивным слоем нихрома (Cu+NiCr) имеет сопротивление (в 5-8 раз) больше сопротивления медного проводника (Cu) с аналогичными параметрами, на средних и высоких частотах (1 МГц – 100 МГц);
- на низких частотах однородный и композитный проводники имеют аналогичные свойства, поскольку постоянный и переменный низкочастотные (до 100 кГц) токи протекают преимущественно в объёме проводящей сердцевины;
- частотная зависимость сопротивления композитной структуры имеет три характерные области: область быстрого увеличения сопротивления проводника, обусловленная оттеснением тока к границе раздела двух сред (Cu-NiCr); граничная область, которая соответствует переходу основной части тока из области Cu в область NiCr; область медленного роста электрического сопротивления, соответствующая протеканию тока в области высокого удельного сопротивления;
- значение частоты перехода соответствующей граничной области определяется, в основном, толщиной резистивного покрытия и смещается в большую или меньшую сторону в зависимости от параметров токопроводящей структуры проводников.

Композитные проводники на основе двух проводящих материалов с различным значением электропроводности и оптимально подобранной геометрией структуры способны выполнять функции помехоподавления и защиты в радиотехнических фильтрах нижних частот (ФНЧ), а также использоваться в качестве конструктивного элемента силовой электроники в устройствах защиты от перенапряжений (УЗИП).

Полученные данные могут быть использованы при разработке силовых помехоподавляющих фильтров и устройств защиты от перенапряжений.

Библиографический список

1. А. А. Власов. Макроскопическая электродинамика. – 2-е изд. – М.: Наука, 2005.
2. А. Н. Матвеев. Электричество и магнетизм. – М.: Высшая школа, 1983. – 463 с.
3. United States Patent, Radio frequency interference suppressor cable having resistive conductor and lossy magnetic absorbing material, 14.03.1978.
4. United States Patent, ID 4079192, Conductor for reducing leakage at high frequencies, 17.11.1981.
5. А.Е. Чижиков, А.А. Лапшин, Д.В. Суворов, А.А. Зеленкевич, Г.П. Гололобов, А.А. Сережин, А.И. Мороз. Исследование информативности емкостей многослойных диэлектрических структур // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2015. - № 3. – С. 144-148.
6. Е.В. Овчинникова, В.А. Фатькин. Особенности моделирования процесса получения диэлектрических покрытий // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2008. - № 3. – С. 71-76.
7. Harry Y.-F. Lam, Analog and digital filters: design and realization // Formely with University of California, Berkeley, 592 p.

УДК 621.316.72; ГРНТИ 44.29.29

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПО ПРИНЦИПУ ЦЕНТРАЛЬНОГО ДИСПЕТЧЕРСКОГО ПУНКТА

В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков, Ю.В. Шарапов, К.В. Иванов
Воронежский государственный технический университет,
Россия, Воронеж, alex_8_90@mail.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается реализация физической моделицентрального диспетчерского пункта применительно к различным типамтехнологических процессов в рамках комплекса лабораторных стендов. Приводятся функциональная и мнемосхема, описываются прикладные возможности рассматриваемой модели.
Ключевые слова: центральный диспетчерский пункт, физическое моделирование, комплекс лабораторных стендов.

PHYSICAL SIMULATION OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES ON THE PRINCIPLE OF CENTRAL CONTROL ROOM

V.N. Krysanov, A.L. Ruckov, Y.V. Sharapov, K.V. Ivanov
Voronezh State Technical University,
*Russia, Voronezh,*alex_8_90@mail.ru

Abstract. This article discusses the implementation of the physical model of the Central control room for the various types of technological processes in the framework of a set of laboratory stands. Provides functional and mnemonic describes the applied possibilities of the model.
Keywords: centralcontrol, physicalsimulation, asetoflaboratorystands.

В современных условиях автоматизированности промышленных и хозяйственных объектов с распределенными параметрами существует необходимость в организации системы централизованного управления. Данная система должна: во-первых, концентрировать и хранить в себе технологические параметры подчиненного оборудования; во-вторых, иметь возможность влиять на каждый из них; в-третьих, визуализировать все необходимые показатели в удобном для оператора виде. В её рамках необходимо создание базы алгоритмов, в соответствии с которыми будет происходить управление по группам регулируемых показателей.В составе различных технологических процессов предприятия описанные выше задачи возлагаются на центральный диспетчерский пункт (ЦДП).

ЦДП является одной из важных составляющих частей автоматизированной системы управления, максимально использующей устройства вычислительной техники для получения, передачи и хранения информации с целью обеспечения наиболее эффективного функционирования производства. Он предназначен для непрерывного контроля и оперативного управления ходом выполнения сменных и суточных плановых заданий производственными комплексами и хозяйствами, а также предприятия в целом, сбора и предварительной обработки информации о состоянии технологических процессов предприятия с фиксацией отклонений хода выполнения заданий от плановых показателей[1,2].

Сложности практического исследования отмеченного класса объектов заключается в невозможности непосредственного изучения (варьирования) групп параметров ввиду высоких затрат, возникающих при этом. Поэтому более применимыми методами изучения являются математическое и физическое моделирование.

Физическое моделирование — метод экспериментального изучения явлений, основанный на подобии реального процесса и используемой модели, реализованный с помощью определённой технико-алгоритмической базы с учётом эффекта масштабируемости. Выводы и данные, полученные в этих экспериментах, распространяются затем на явление в реальных масштабах.

Метод может дать надёжные результаты, лишь в случае соблюдения физического подобия реального явления и модели. Это достигается за счёт соблюдения равенства для модели и реального явления значений критериев подобия — безразмерных чисел, зависящих от физических (в том числе геометрических) параметров, характеризующих явление. Экспери-

ментальные данные, полученные отмеченным методом моделирования, распространяются на реальные процессы в технологических процессах. [1]

В широком смысле, любой лабораторный физический эксперимент является моделированием, поскольку в эксперименте наблюдается конкретный случай процесса в частных условиях, а требуется получить общие закономерности для всего класса подобных явлений в широком диапазоне условий.

С целью изучения принципов построения такой составной части автоматизированной системы управлениядля отработки навыков оценки различных ситуаций в современных АСУ и своевременного принятия решений на базе кафедры ЭАУТС ВГТУ создана физическая модель вышеописанной системы объединенного диспетчерского пункта. На базе модели реализованы необходимые для объединения и автоматизации функции. В качестве подчиненных устройств выступают следующие лабораторные стенды:

- генерации и распределения тепловой мощности с использованием нетрадиционных источников энергии;

-изучения режимов работы и нагрузки асинхронного двигателя с частотным управлением.

Каждый из стендов, находящихся под контролем объединенного диспетчерского пункта, представляет собой физическую модель отдельного технологического процесса.

Объединенный диспетчерский пункт собирает информацию с подчиненных стендов, получая ее с преобразователя частоты (напряжение питания и частота вращения асинхронного двигателя, напряжение питания и частота вращения нагрузочного двигателя постоянного тока) стенда с асинхронным двигателем и программируемого логического контроллера (значения с трех датчиков температуры, состояние насоса, текущая мощность охладителя и текущая мощность нагревателя) стенда генерации.

Полученные данные отображаются на мнемосхеме технологического процесса, которая является связующим звеном человеко-машинного интерфейса. Она приведена на рисунке 1. Оператор анализирует по мнемосхеме состояние оборудования, показания датчиков и составляет полную картину о происходящих в подчиненном оборудовании процессах. С помощью регуляторов на мнемосхеме возможно осуществление непосредственного диспетчерскогоуправления параметрами оборудования: изменение значения частоты вращения асинхронного двигателя;варьирование напряжения питания нагрузочного двигателя постоянного тока; изменение значения мощности нагревателя и охладителя, включение и отключение насоса [3].

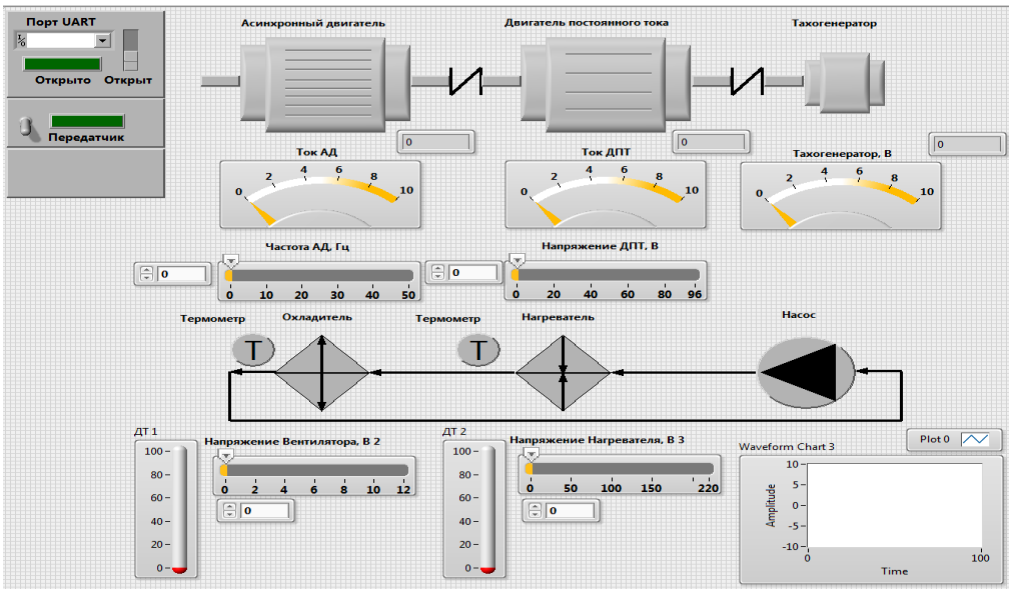


Рис. 1. Мнемосхема объединенного диспетчерского пункта

На рисунке 2 приведена функциональная схема физической модели объединенного диспетчерского пункта.

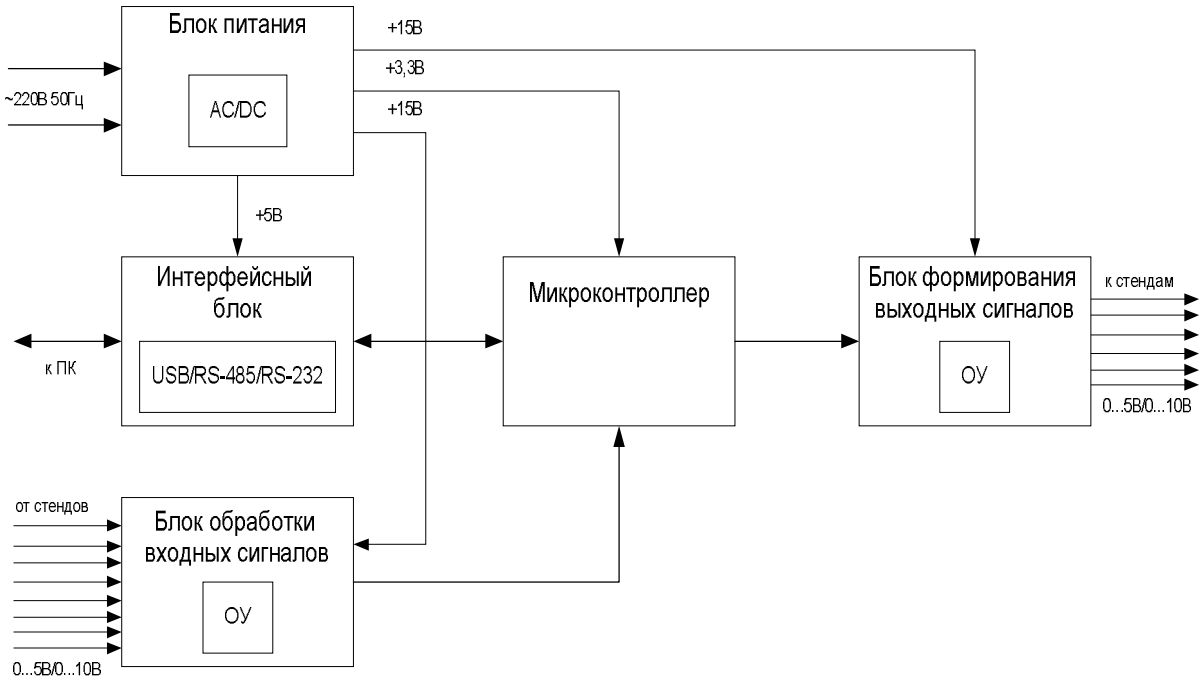


Рис. 2. Функциональная схема объединенного диспетчерского пункта

Как видно из рис. 2, лабораторный стенд состоит из нескольких узлов, каждый из которых отвечает за выполнение определенной задачи. Блок питания преобразовывает входное переменное напряжение 220 В, 50 Гц в постоянное со значениями +3,3В, +5В и +15В, которые необходимы для питания остальных элементов. Интерфейсный блок обеспечивает обмен данными лабораторного стенда с персональным компьютером и поддерживает интерфейсы USB, RS-485, RS-232.Все сигналы, передаваемые от подчиненного оборудования, поступают на блок обработки входных сигналов. В нем происходит прием и согласование уровней напряжения сигналов. Далее, принятые и отмасштабированные сигналы поступают на входы микроконтроллера, который производит их обработку, формирует массив данных для отправки на персональный компьютер, а также подает управляющее воздействие на блок формирования выходных сигналов. Для управления подчиненным оборудованием необходимо усилить управляющие сигналы микроконтроллера и преобразовать в аналоговый вид. Данные процессы происходят в блоке формирования выходных сигналов. Цифро-аналоговый преобразователь в его составе отвечает за формирование аналогового сигнала из цифрового кода, а операционные усилители обеспечивают согласование уровней напряжений.

Результаты физического моделирования представлены на рисунках 3, 4.

На рисунке 3 представлен процесс нагрузки, как функции времени, асинхронного двигателя с помощью двигателя постоянного тока. По графикам можно заметить, что при увеличении токаДПТ происходит уменьшение частоты вращения асинхронного двигателя, что объяснимо с физической точки зрения протекающими процессами преобразования в электромеханической системе. Для создания данного режима работы используется ползунок «Напряжение ДПТ», с помощью которого регулируется значение напряжения, подаваемого на обмотки двигателя постоянного тока. Он перемещается в сторону увеличения напряжения (вправо). При перемещении в обратную сторону напряжение на двигателе постоянного тока снижается и происходит разгрузка асинхронного двигателя. Данный режим изображен на рисунке 4. При этом частота вращения асинхронного двигателя увеличивается при неизменном значении задания частоты.

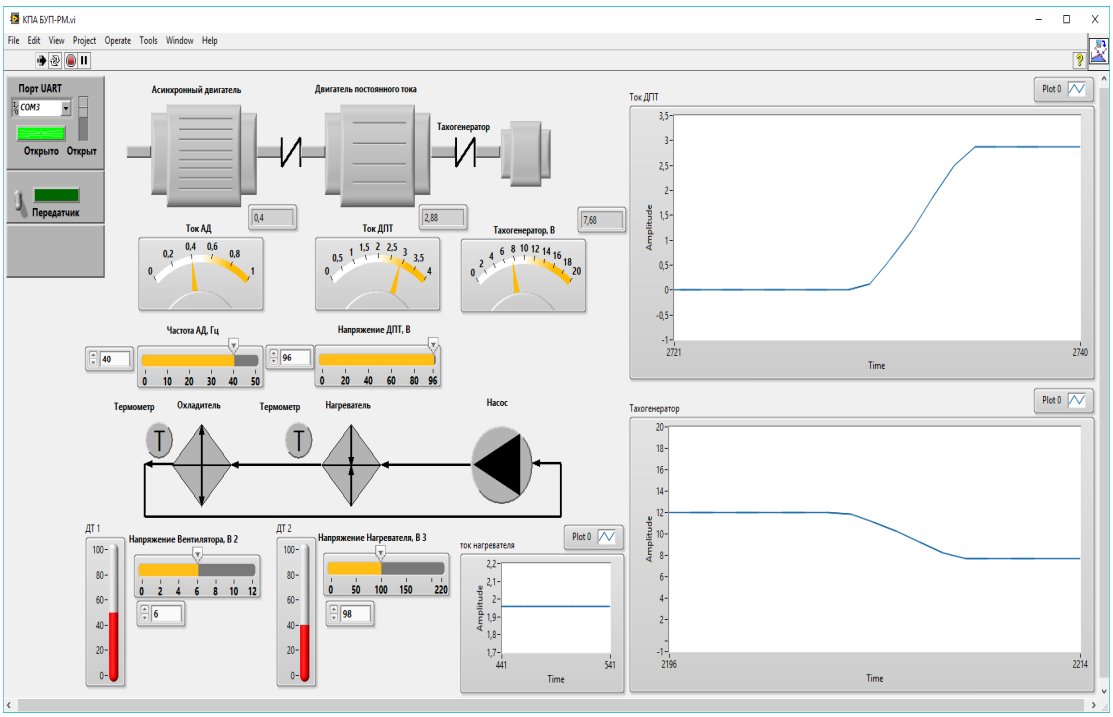


Рис. 3. Нагрузка асинхронного двигателя, как функция от времени

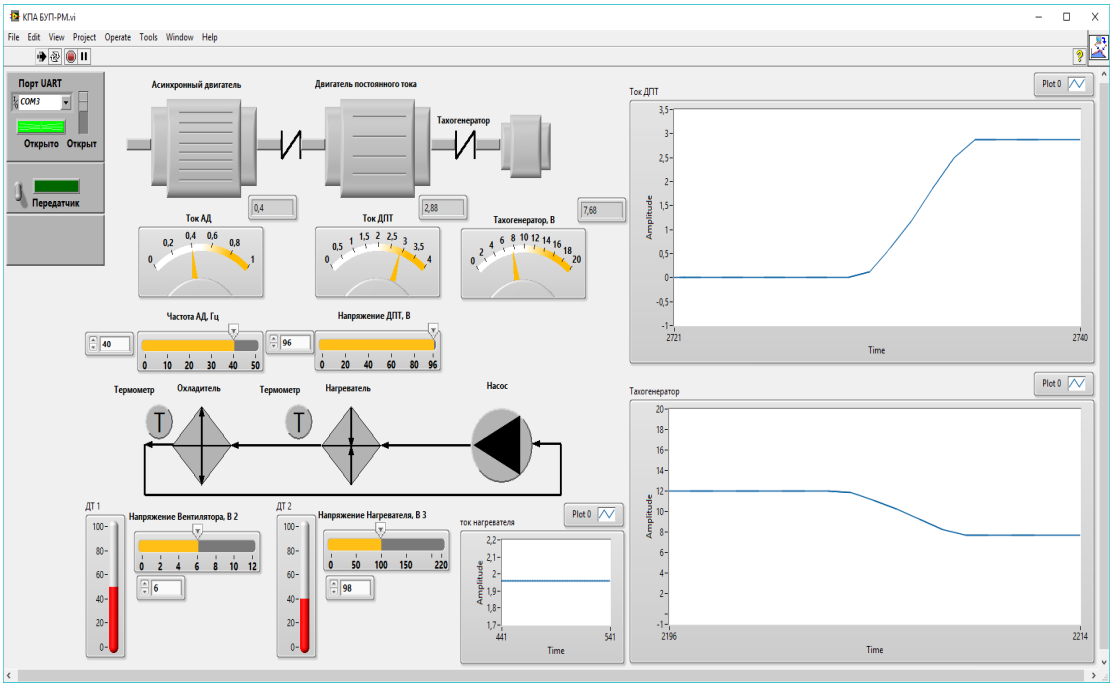


Рис. 4. Разгрузка асинхронного двигателя

Таким образом, созданная физическая модель обеспечивает сопряжение низкоуровневых объектов и их систем управления с автоматизированной системой управления более высокого уровня и человеко-машинным интерфейсом. Лабораторный стенд имеет универсальные входы и выходы, рассчитанные для подключения устройств электроники промышленного стандарта: конфигурируемые аналоговые входы и выходы (0…5) В или (0…10) В. Помимо этого, она обладает универсальностью в части возможности рассмотрения различных вариаций технологических процессов, интересующих исследователя. Количество максимальных входных переменных от подчиненного оборудования, передаваемых с помощью аналоговых сигналов, равно 8, а количество выходных аналоговых каналов передачи равно 6. Подключение к персональному компьютеру также осуществляется по стандартным интерфейсам: USB, RS485, RS232. Для лабораторного стенда не требуется специального источника питания и достаточного переменного напряжения 220 В, 50 Гц.

Реализованная модель объединённого диспетчерского пунктапозволяет производить исследование смежных технологических процессов крупных промышленных и коммунальных объектов: подсистем ЖКХ; производства различных типов продукции; управления в структуре топливно-энергетического комплекса [4].

Библиографический список

1. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике, М.: Наука, 1977. - 440 с.
2. Крысанов В.Н. Особенности реализации технологии SmartGrid в региональных системах электроснабжения / В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков, Шукур Омар Шукур Махмуд // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014.– т.10 – № 5-1.– с. 92-97.
3. Крысанов В.Н. Разработка физических моделей объектов энергетики / В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков, Д.П. Лащёнов// Актуальные научные исследования XXI века: теория и практика. 2015. т.3, №7-2 (18-2).
4. Крысанов В.Н. Повышение энергоэффективности и энергосбережения промышленных узлов нагрузки / В.Н. Крысанов, Ю.В. Шарапов, А.Л. Руцков // Современные технологии в науке и образовании – СТНО – 2016 сб. тр. междунар. научн. техн. и науч. – метод. конф. в 4 томах. Рязанский государственный радиотехнический университет под общ. ред. О.В. Миловзорова, 2016. с. 280-284.

УДК 681.5.01, 621.31.44, 621.311.16; ГРНТИ 44.29.29

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ И НЕЧЁТКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В СУ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПИТАЮЩИХ ПОДСТАНЦИЙ

А.Л. Руцков

Воронежский государственный технический университет,

Россия, Воронеж, alex_8_90@mail.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается применение принципов нечётких нейронных сетей в структуре систем управления силовых трансформаторов питающих подстанций 220/110 кВ с учётом изменяющейся во времени потребительской нагрузки. Отмечены аспекты, позволяющие повысить степень энергетической эффективности рассматриваемого класса объектов.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, система управления, нечёткие нейронные сети, показатели энергетической эффективности, имитационное моделирование.

THE APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL AND FUZZY NEURAL NETWORKS IN THE SU POWER TRANSFORMERS SUPPLY SUBSTATIONS

A.L. Ruckov

Voronezh State Technical University,

*Russia, Voronezh,*alex_8_90@mail.ru

Abstract. This article discusses the application of the principles of fuzzy neural networks in the structure of control systems of power transformers supply substations 220/110 kV with accounting time-varying consumer loads. Noted the aspects that can increase the energy efficiency of this class of objects.

Keywords: power transformers, control system, fuzzy neural network, energy efficiency, simulation.

На современном этапе, для электросетевой отрасли РФ характерна невысокая эффективность работы всех объектов системы (в сравнении с аналогичными зарубежными структурами в развитых регионах). Как отмечено в [1-3], решение этого вопроса наиболее продуктивно решается с привлечением FACTS концепции (которая подразумевает широкое применение современных аппаратных и алгоритмических решений). Первым этапом реализации этого подхода является анализ элементов ЭЭС.

Важнымзвеном энергосистем являются базовые (330 кВ и выше) и питающие (110-330 кВ) подстанции (ПС). В качестве примера рассмотрим функционирование типовой ПС 220 кВ «Южная», находящуюся в зоне ответственности Воронежского РДУ (филиал ПАО «ФСК ЕЭС»). Как отмечено в [1,2], для данный объект с позиций оперативного управления характеризуется следующими показателями:

– степень загрузки АТ – 1 в часы минимума : 32 – 43 % от номинального значения; в часы максимума: 55 – 74;

– степень загрузки АТ – 2 в часы минимума : 27 – 37 % от номинального значения; в часы максимума: 40 – 68;

– степень загрузки АТ – 3 в часы минимума : 28 – 29 % от номинального значения; в часы максимума: 42 – 50.

Таким образом, средняя загруженность АТ составляет 30 – 70 % в рассматриваемой выборке (режимные дни с 2011 по 2013 года).

Особо отметим низкую эффективность использования данного оборудования, обусловленную неиспользованием устройств РПН и ВДТ : постоянная работа на одной и той же отпайке; неиспользование принципа продольно-поперечного регулирования (а следовательно невозможность влияния на потоки активной и реактивной мощности с целью снижения общих нагрузочных потерь).

Подобная ситуация является следствием недостоверного прогноза потребления загрузки ПС 220 кВ «Южная», и, вместе с тем, неиспользованием средств регулирования напряжения силового оборудования.

Анализ нагрузочных потерь электроэнергии по точкам учёта по стороне 110 кВв соответствии с методикой, приведённой в [4], позволяет говорить о недостаточной степени соответствия показателям энрегоэффективности рассмотренного элемента транспорта электрической энергии.

Следствием текущего состояния технического оборудования и алгоритмического обеспечения ПС 220 кВ «Южная» является превышение реально сложившихся нагрузочных потерь в сравнении с нормативными потерями (при сравнении реального графика потребления э/э и режима при $tg_{ср}\varphi$=0,5) составивших 14 891,53 кВтч/день (22 784,05 руб./день без НДС в ценах 2013 года).

Кроме того, особенности функционирования оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ), участником которого является ПАО «ФСК ЕЭС» (принадлежность ПС 220 кВ «Южная»), заключаются в требовании к формированию наиболее точных заявок (или же выходу на балансирующий рынок – БР – с значительно более высокими, нежеле чем на рынке на сутки вперёд – РСВ, тарифами покупки энергоресурсов) субъектами отмеченной структуры. Этот факт является непосредственным стимулом повышения точности

В этом контексте особую значимость приобретает прогнозирование потребления электроэнергии субъектами ОРЭМ как на краткосрочный, так и на долгосрочный период. В первом случае, точность прогнозирования может и должна рассматриваться как один из источников экономии энергоресурсов и денежных средств. Во втором случае, наиболее важным является взаимосвязь сводного прогнозного баланса (СПБ) – нормативной основы для формирования тарифов в электроэнергетики и долгосрочного прогноза потребления электроэнергии.

Сложность прогноза здесь обусловлена многофакторностью функции потребления электроэнергии субъектами ОРЭМ. В частности, как было показано в [3] наиболее укрупнено можно рассматривать такие две группы факторов, как: технико-экономические (производственный график работы, нагрузочные характеристики оборудования конечных потребителей, затраты на поддержание и развитие электроэнергетического сектора) и климатические (температура окружающей среды, степень освещённости, долгота дня, фактор природных катаклизмов).

При этом, стандартным критерием организации ЭЭС [3,5] является минимизация функционала Ф потерь э/э – S, как функции от величины потребления – P(при этом потребление, как было отмечено выше, само является многофакторной функцией): $\Phi\langle S(P)\rangle \to \min$.

В настоящее время наиболее перспективным является решение поставленной задачи с опорой на гибридные ННС с возможностью применения лингвистических переменных [1]. Такой подход правомерен по нескольким причинам: неполнота данных, существенно влияющая на статистические методы не имеет столь решающей роли при данном подходе; существует органическая возможность сопряжения ННС с экспертными системами; избыточность лингвистических переменных позволяет работать с подобными гибридными сетями

без обращения к внутренней структуре и процедурам, что позволяет существенно упростить работы при проведении прогнозирования в режиме реального времени.

Обобщённая функциональная схема ННС прогнозирования потребления э/э представлена на рисунке 1.

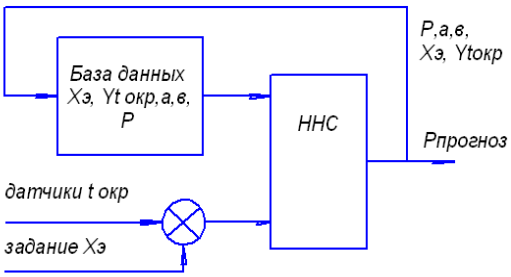


Рис. 1. Функциональная схема работы модели ННС для прогнозирования уровня потребления электроэнергии

Обозначения, принятые на рисунке 1: $X_Э(t)$ – величина необходимой валовой выручки – НВВ (экономический показатель) от деятельности субъекта ОРЭМ; $Yt_{окр}(t)$ – температурный фактор (климатический показатель); a и b – соответствующие экономическому и климатическому фактору коэффициенты коррекции; P – потребления предыдущего периода [кВтч]; P прогноз – прогнозируемая величина потребления э/э в будущий период.

В качестве базового алгоритма обучения наиболее целесообразно (для поставленной задачи) использование подхода Такаги-Сугено согласно выражению (1):

$$R^k : если\ \ x(t-1)\ \ есть\ \ X_1^k,\ \ x(t-r)\ \ есть\ \ X_r^k, то\ \ y(t) = a_0{}^k + \sum_{l=1}^{r} a_l{}^k y(t-1), k = \overline{1,k} \qquad (1)$$

где R^k – набор правил для функционирования; $x(t) = (x_1(t),...,x_m(t))$ – вектор входных переменных; $y(t)$ – вектор выходной величины; X_1^k, X_m^k, Y^k – области значений соответствующих входных и выходных значений; a^k - константа, выражающая соответствие выходной величины взвешенному воздействию входных величин.

При оценке качества обучения сети используется целевая функция, чаще всего представляемая в виде квадратичной суммы разностей между фактическими и ожидаемыми значениям выходных сигналов. Пусть, при некотором количестве *(j=1,2,...,p)* обучающих выборок *(x,e)* целевая функция определятся как [6]:

$$E(w) = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{p}\sum_{m=1}^{M}(y_m^{(j)} - e_m^{(j)})^2 \qquad (2)$$

где m- число выходных сигналов сети;

j- число обучающихся выборок, подаваемых на вход сети;

$y_m^{(j)}$ - выход сети на j-том шаге;

$e_m^{(j)}$ - требуемый выход сети на j-том шаге;

$E(w)$ - целевая функция нейронной сети.

Цель обучения в таком случае состоит в настройке весов каждого нейрона таким образом, чтобы при заданном входном векторе получить на выходе значения сигналов, совпадающих с требуемой точностью с ожидаемыми значениями - e_i при $i = 1, 2, \ldots, M$.

Представим в виде таблицы 1 входные и выходные параметры модели прогнозирования энергопотребления субъекта ОРЭМ.

Следует отметить, что числовые значения входов нечёткой нейронной сети нормированы в диапазоне [0…1].

Таблица 1 - Входные и выходные сигналы нечёткой нейронной сети

№ п/п	Тип сигнала	Наименование сигнала	Единица измерения	Интервал измерения
1	Входной	Температура окружающей средыT(k)	Нормированное значение, %	-250%…120%
2	Входной	ОблачностьQ(k)	Нормированное значение, о.е.	0…1
3	Входной	Тип временного интервала прогнозированияP*(k)	Нормированное значение, о.е.	1…3
4	Выходной	Прогнозное значение потребления э/эP(k+n)	Нормированное значение, о.е.	0,6…2,5

Сведём в таблицу 2 данные по выборки моделей, построенных в соответствии с данными таблицы 1 для сравнительного анализа различных вариантов реализации ННС краткосрочного и среднесрочного прогноза субъекта рынка ОРЭМ.

Таблица 2 - Сравнительный анализ реализаций моделей на базе ННС

Алгоритм обучения нечёткой нейронной сети - Сугено(hybrid)		Тип входных термов принадлежности					
		psigmf	trimf	trapmf	gaussmf	pimf	dsigmf
Обучающая выборка	E	0,011	0,035	0,024	0,017	0,015	0,012
	ε_n	0,054	0,123	0,089	0,095	0,077	0,073
	r	0,983	0,934	0,956	0,971	0,983	0,981
	$\varepsilon_{\%}$	2,103	4,381	4,218	3,847	3,478	2,100
Число эпох обучения		61	98	197	188	195	63
Время обучения, с.		7,2	5,1	6,3	6,1	6,9	8,5
Тип процессора		AMD FX(tm) – 8350 Eight – Core Processor (4,00 ГГц)					

Для случая с наилучшим показателем (при использовании терма типа dsigmf) построены графики, отображающие величину ошибки при обучении ННС – рисунок 2, на рисунке 3 – выходные значения поверхностей прогнозной величины, как функции от входных параметров.

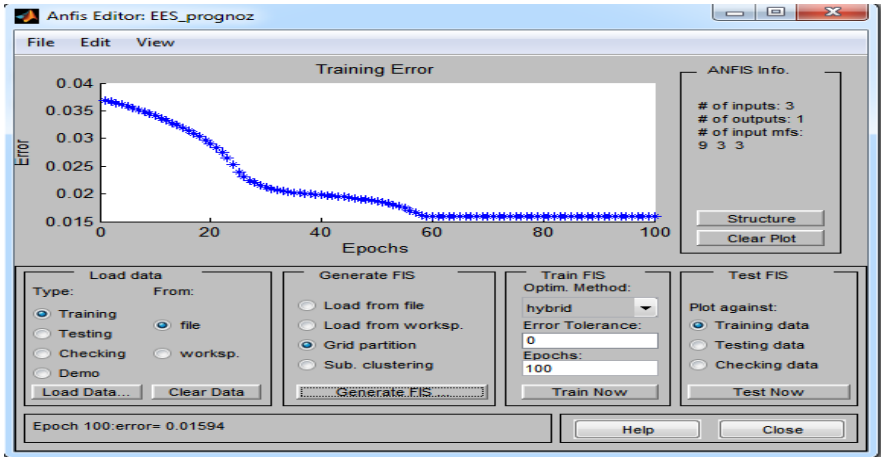


Рис. 2. Величина ошибки при обучении нечёткой нейронной сети (тип входного терма - dsigmf)

Кроме отмеченных стимулов снижения затрат в силовом оборудовании питающих ПС (снижение нагрузочных потерь и уменьшение доли электроэнергии, покупаемой на БР, за счёт улучшенного прогноза потребления энергоресурсов) следует отметить возможности ИНС и ННС для решения задач мониторинга текущего состояния данных элементов ЭЭС.

Отметим основные выводы:

– повышение энергетической эффективности ЭЭС «в целом» и силового трансформаторного оборудования, в частности, лежит в развитии аппаратной и программно-алгоритмической базы в формате активно-адаптивных систем (FACTS - технологии);

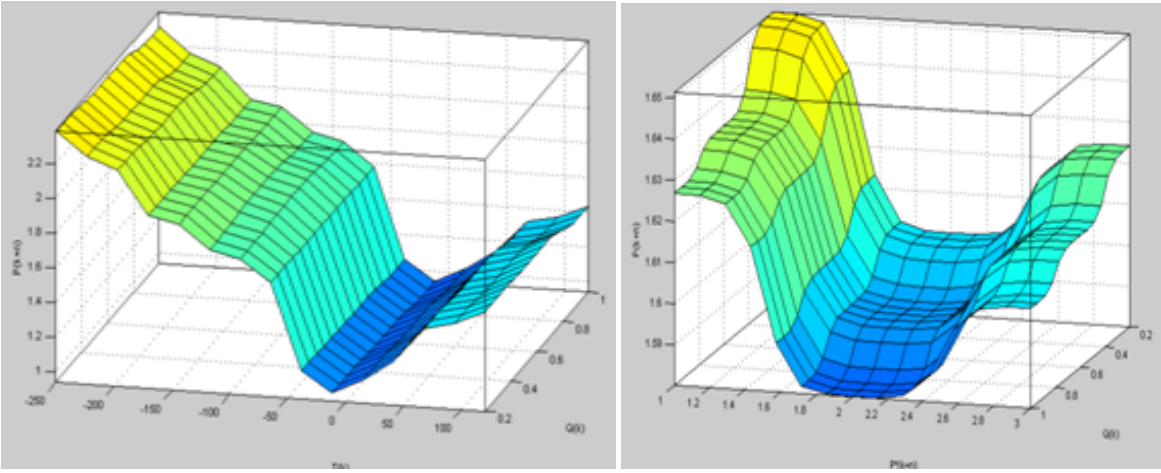


Рис. 3. Поверхности прогнозной величины (тип входного терма - dsigmf)

– существенным фактором, определяющим неоптимальность функционирования СУ отмеченного класса элементов ЭЭС является неучёт фактической потребительской нагрузки (и её характера) в режиме реального времени;

– средняя величина превышения нагрузочных потерь (ввиду слабого учёта реальной нагрузки сети) от нормативного показателя составляет для ПС 220 кВ «Южная» 14 891,53 кВтч/день (22 784,05 руб./день без НДС в ценах 2013 года);

- применение ННС в составе системы прогнозирования потребления электроэнергии для нужд субъекта ОРЭМ (ПАО «ФСК ЕЭС») позволяет добиться точности прогноза порядка 1,2 – 1,5% при аналогичных показателях классических методов [2,6,7] – 3-5%;

- повышение точностных характеристик прогноза позволит, с одной стороны, снизить долю, приобретаемую на балансирующем рынке субъектом ОРЭМ, а с другой, добиться снижения нагрузочных потерь в силовых трансформаторах (в рамках статьи не учитывался аспект снижения нагрузочных потерь в ЛЭП, что будет являться дополнительным положительным экономическим фактором);

- применение ИНС и ННС для задач мониторинга СУ силового трансформаторного оборудования питающих ПС позволяет повысить точность оценки рабочих параметров (в частности: температуры наиболее нагретых точек и влажности обмоток) в сравнении с методикой IEC60076-7 на величину порядка 2-5%, что является предпосылкой для увеличения надёжности рассматриваемого типа элементов ЭЭС.

Библиографический список

1. Крысанов В.Н. Вопросы концептуального развития Smart Grid в электроэнергетике с применением искусственных нейронных и нейро-нечётких сетей / В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков // Электротехнические комплексы и системы управления - 2014.– №1. – С.7 – 14.

2.Крысанов В.Н. Анализ энергетической эффективности управления режимами сетей 220 – 500 кВ ООО «Системный оператор единой энергетической системы» на территории Воронежской области / В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков // Электротехнические комплексы и системы управления - 2015.– №1. – С.75 – 80.

3. Литвиненко А.М., Семынин А.А. Адаптивные системы управления.- Воронеж, 2006. – с. 136.

4. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчётов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 465 с.: ил.

5. Крысанов В.Н. Прогнозирование потребления электроэнергии территориальными сетевыми организациями с использованием методов нейро-нечётких сетей / В.Н. Крысанов, К.С. Гамбург, А.Л. Руцков // Электротехнические комплексы и системы управления - 2014.– №2. – С.40 – 46.

6. В.Н. Крысанов Прогнозирование потребления электроэнергии промышленными предприятиями с использованием методов искусственных нейронных и нейро-нечётких сетей/ В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков // Международная (XIX Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу (АЭП-2014), Саранск, 7-9 октября 2014 г.

7. Крысанов В.Н. Системная оптимизация экономических показателей функционирования системного оператора в воронежской энергосистеме/ В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков, Шукур Омар Махмуд // Электротехнические комплексы и системы управления - 2015.– №3. – С.62 – 67.

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА»

УДК 621.382.3; ГРНТИ 29.19.31

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ВОЛЬТ-ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Т.А.Холомина, А.Ю. Холомин, А.Р. Семенов, Д.С. Логинов
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, sem-a-sem@mail.ru

Аннотация. Проведен анализ существующих теоретических представлений о механизмах генерации низкочастотного шума в полупроводниковых барьерных структурах. Показано, что изучение и моделирование вольт-шумовых характеристик создают возможность более точного расчета параметров глубоких центров, а также прогнозирования надежности полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: низкочастотный шум, теории генерации, барьерная структура, вольт-шумовая характеристика.

INVESTIGATION OF SEMICONDUCTOR BARRIER STRUCTURES BY VOLT-NOISE CHARACTERISTICS METHOD

T.A. Kholomina, A.Yu. Kholomin, A.R. Semenov, D.S. Loginov
Ryazan State Radioengineering University,
Russia, Ryazan, sem-a-sem@mail.ru

Abstract. The analysis of existing theoretical concepts about the generation mechanisms of low-frequency noise in semiconductor barrier structures is performed. It is shown that investigation and simulation of voltage-noise characteristics make an opportunity to calculate deep level parameters more precisely and to predict reliability of semiconductor devices.

Keywords: LF noise, generation theories, barrier structure, voltage-noise characteristic.

Введение

Спектроскопия низкочастотного (НЧ) или избыточного шума является высокочувствительным методом изучения особенностей флуктуационных явлений в полупроводниковых барьерных структурах и определения параметров глубоких центров (ГЦ). Обоснованное применение метода НЧ шумовой спектроскопии сдерживается отсутствием единого мнения исследователей о механизмах формирования низкочастотного шума в полупроводниковых барьерных структурах с глубокими уровнями (ГУ) [1,2].

Целью настоящей работы явился анализ существующих теоретических моделей генерации НЧ шума в полупроводниковых барьерных структурах, а также возможностей применения вольт-шумовых характеристик (ВШХ) для анализа параметров и прогнозирования надежности приборов и структур.

Анализ проблемы

Важными и актуальными являются вопросы, остающиеся дискуссионными на протяжении не одного десятилетия: является ли низкочастотный шум результатом флуктуаций концентрации свободных носителей заряда или их подвижности; высоты потенциального барьера или толщины обедненной области; эффектом объемным или поверхностным и т.д. Возможными причинами шума могут быть флуктуации температуры, диффузионная перестройка кристаллической решетки, химические реакции в твердой фазе, рождение и аннигиляция микродефектов в кристаллической решетке и др.

Одно из приближений, часто называемое моделью Мак-Уортера, сводит причину НЧ или шума вида $1/f^{\gamma}$ (f - частота, γ - показатель степени, изменяющийся от 0,8 до 2) к флуктуациям числа свободных носителей заряда [3]. Отличительной особенностью приближения Мак-Уортера являются флуктуации концентрации носителей заряда на объемных ловушках как результат генерационно-рекомбинационных процессов. Если релаксационный процесс характеризуется одним ловушечным уровнем с постоянной времени τ, то зависимость спектральной плотности мощности (СПМ) шума от частоты определяется спектром Лоренца-Дебая [1].

Альтернативное приближение, называемое моделью Хоуге [4], предполагает, что природа НЧ-шума обусловлена флуктуациями подвижности свободных носителей заряда вследствие особенностей их рассеяния. Такие центры рассеяния, как неоднородности, резкие структурные переходы, контакты по [5] не являются источниками дополнительных флуктуаций, но выступают в роли «детекторов», «усилителей» объемного шума.

В сильно легированных полупроводниках было замечено значительное снижение НЧ шума. Для объяснения этого эффекта высказано предположение, что флуктуирует только та часть подвижности, которая обусловлена рассеянием на фононах, а вклад в подвижность, связанный с рассеянием на примесях, флуктуаций не испытывает [6].

В [7] предложена модель, объясняющая зависимость интенсивности НЧ шума от концентрации носителей заряда в предположении, что источником являются флуктуации подвижности. Для неомической области работы МОП-транзистора в [8] установлено, что НЧ шум имеет два типа коррелированных флуктуаций: 1) флуктуации подвижности носителей; 2) флуктуации числа носителей заряда, обусловленные флуктуациями эффективного напряжения на затворе, которые вызваны флуктуациями подвижности.

В [9] показано, что пространственные некоррелированные флуктуации подвижности, независимо от их физического механизма, не могут существовать без локальных флуктуаций общей плотности носителей заряда. В [5] указано, что модели флуктуаций числа носителей и флуктуаций подвижности в определенной мере «перекрываются» друг с другом, так как, например захват носителей на ловушки должен приводить к флуктуациям их эффективной подвижности.

Отметим, что к описанной выше проблеме тесно примыкает две другие концепции описания механизма генерации НЧ шума в полупроводниковых барьерных структурах: являются ли низкочастотные флуктуации следствием флуктуаций высоты потенциального барьера или толщины области пространственного заряда (ОПЗ). Во многих работах справедливо полагают, что флуктуации концентрации свободных носителей заряда и их подвижности происходят вследствие флуктуаций заселенности глубоких центров, пространственно локализованных в ОПЗ барьерных структур. Модель Халлгрена [9], описывающая механизм генерации НЧ шума в ОПЗ полевого транзистора на GaAs, объединяет флуктуации толщины ОПЗ с флуктуациями сопротивления канала. Важным аспектом модели [9] является зависимость спектров НЧ шума от напряжения на затворе Шоттки, которое изменяет толщину обедненной области.

В [10] Цу предложена модель генерации НЧ шума в кремниевых диодах с барьером Шоттки. Обнаружено, что преобладающим механизмом в модуляции высоты барьера металл-полупроводник являются флуктуации зарядового состояния глубоких центров, распределенных по энергии и объему полупроводника.

Анализ существующих теоретических приближений и экспериментальных результатов свидетельствуют о том, что рассмотренные механизмы генерации избыточного шума (флуктуации числа носителей и подвижности, высоты и толщины барьера) в полупроводниковых приборах действуют одновременно. В подавляющем большинстве опубликованных работ авторы придерживаются мнения, что НЧ шум связан с флуктуациями зарядового состояния глубоких центров, обусловленных наличием дефектов структуры полупроводникового материала. Такой шум называют также генерационно-рекомбинационным [1,2].

К наиболее общим свойствам избыточного низкочастотного шума авторы обзора [5] относят то, что он всегда выступает как спутник стационарно протекающих необратимых процессов. Его вклад исчезает из спектров функций электрического тока или потенциала, когда исчезают необратимые потоки, в которых происходит перенос заряда, и система переходит в термодинамически равновесное состояние. Генерация НЧ шума является в основе своей неравновесным процессом, связанным с переносом заряда. Многие авторы отмечают экспериментальный факт: избыточный шум наблюдается только при протекании через исследуемый объект электрического тока (его иногда называют «токовым» шумом). Это ука-

зывает на необходимость описания НЧ шума как результата движения носителей заряда, создающих этот ток.

Отметим общие черты, свойственные подчас альтернативным моделям генерации избыточного шума:

- удовлетворительное соответствие экспериментальных результатов расчетным при описании спектров НЧ шума суперпозицией множества составляющих лоренцевой функции, характеризующегося набором времен релаксации процессов;
- доминирующее влияние на спектры НЧ-шума флуктуаций зарядового состояния созданных дефектами структуры глубоких центров, пространственно локализованных на внешней границе (поверхности) или в объеме ОПЗ барьерной структуры;
- термоактивационный характер низкочастотных флуктуаций, обусловленных эмиссией носителей с ГУ и последующей рекомбинацией;
- флуктуации концентрации и (или) подвижности носителей заряда, сопровождающие неравновесный процесс их направленного движения под действием электрического поля ОПЗ;
- зависимость СПМ НЧ шума от напряжения электрического смещения, создающего в различных полупроводниковых структурах слои, обедненные носителями заряда.

Последняя из указанных общих закономерностей отмечается многими авторами, однако адекватной физической модели, объединяющей указанные особенности генерации избыточного шума полупроводниковых и характер ВШХ барьерных структур, пока не создано.

П.Т.Орешкиным с соавторами разработана и апробирована активационно-дрейфовая модель, позволяющая описывать ряд релаксационных процессов в полупроводниковых барьерных структурах [11].

Активационно-дрейфовая модель генерации НЧ шума в полупроводниковых барьерных слоях основана на рассмотрении двух совместных статистических событий эмиссии с ГУ и дрейфа в поле ОПЗ носителей заряда. Генерация НЧ шума в обратно смещенных барьерных структурах обусловлена тепловыми флуктуациями уровня Ферми, которые приводят к эмиссии электронов (флуктуациям их концентрации) в активной части ОПЗ, например с донорных глубоких уровней в зону проводимости и их дрейфу к электронейтральной области. Это создает во внешней цепи шумовые импульсы тока разной амплитуды и длительности.

Активационно-дрейфовая модель естественным образом объединяет альтернативные подходы к описанию процесса формирования НЧ шума: совокупность флуктуаций процессов эмиссии и дрейфа носителей отражает как флуктуации концентрации носителей заряда, так и их подвижности за счет рассеяния при дрейфе в ОПЗ. Активационно-дрейфовый механизм объединяет корпускулярный подход к эмиссии с ГУ и дрейфу в ОПЗ отдельных носителей с коллективным подходом к описанию кинетических флуктуационных процессов в совокупности статистических ансамблей активируемых и дрейфующих коллективов микрочастиц.

Обоснованием широкого диапазона изменения времени релаксационного процесса τ активационно-дрейфовая модель устраняет одну из основных трудностей теоретического описания процесса генерации НЧ шума [12]. Наличие широкого диапазона времен релаксации флуктуационных процессов τ, составляющего несколько порядков величин, обусловлено изменением не только энергии активации носителей заряда, но и предэкспоненциального множителя τ_0 в пределах $0 < \tau_0 \leq 2\tau_м$ ($\tau_м = \varepsilon\varepsilon_0\rho$ - время максвелловской диэлектрической релаксации; ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника; ε_0 –вакуумная постоянная; ρ – удельное сопротивление базы диодной структуры). Кроме того, в ряде работ отмечено, что процессы релаксации заряда в базе прибора происходили с постоянной времени максвелловской релаксации.

Условием применимости активационно-дрейфовой модели для описания релаксационных процессов и определения параметров ГУ является создание неравновесного заполнения ГУ при обратном смещении барьерного слоя. При этом происходят статистически непрерывная генерация носителей с ГУ и их дрейф в поле ОПЗ к электронейтральной базе.

Аргументами в пользу справедливости активационно-дрейфовой модели являются также зависимости параметров релаксационных процессов при нестационарной спектроскопии глубоких уровней и спектроскопии НЧ шума от удельного сопротивления базы барьерной структуры и приложенного обратного смещения [12,13].

Анализ опубликованных рядом авторов экспериментальных результатов показал, что спектры НЧ шума полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов, фоторезисторов, датчиков ионизирующего излучения) имеют аналогичный характер, подобны и их ВШХ [14]. Это свидетельствует об общности механизмов формирования низкочастотных флуктуаций. На рисунках 1, 2 приведены примеры спектров НЧ шума различных полупроводниковых барьерных структур при изменении напряжения электрического смещения [15, 16], а на рисунках 3,4 – ВШХ [17, 18].

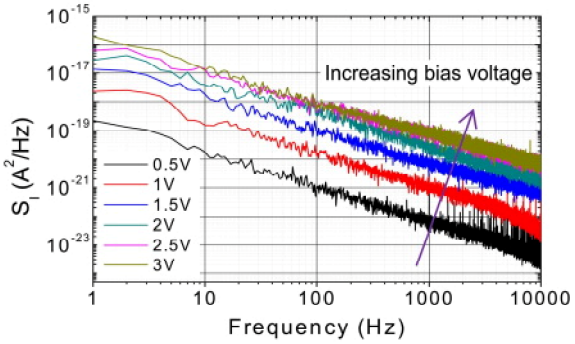


Рис. 1. Токовый спектр мощности шума (S_I) GaAsSb диода Шоттки как функция частоты при различных значениях напряжения смещения [15]

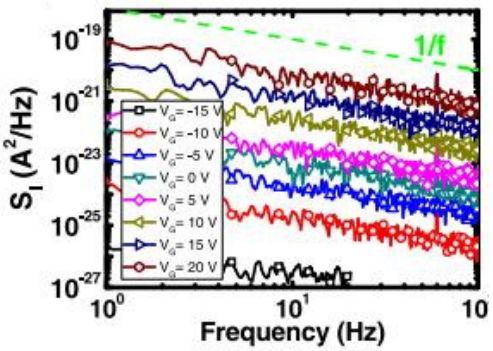


Рис. 2. Спектральная плотность мощности НЧ шума тока стока (S_I) транзистора типа металл-нановолокно-металл при различных значениях напряжения на затворе (V_G) [16]

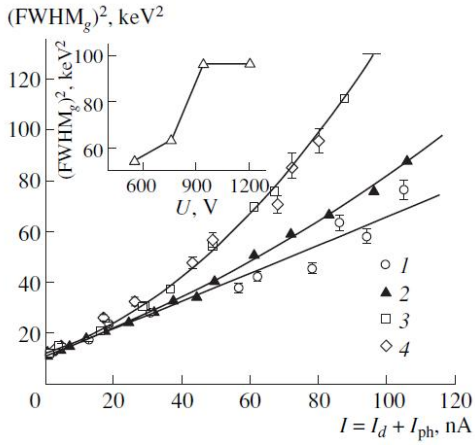


Рис. 3. Зависимость интенсивности НЧ шума от величины тока при вариации напряжения на детекторе U, кВ: 1 — 0,55, 2 — 0,76, 3 — 0,94, 4 — 1,2. На вставке – зависимость интенсивности НЧ шума от напряжения при токе 80 нА [17]

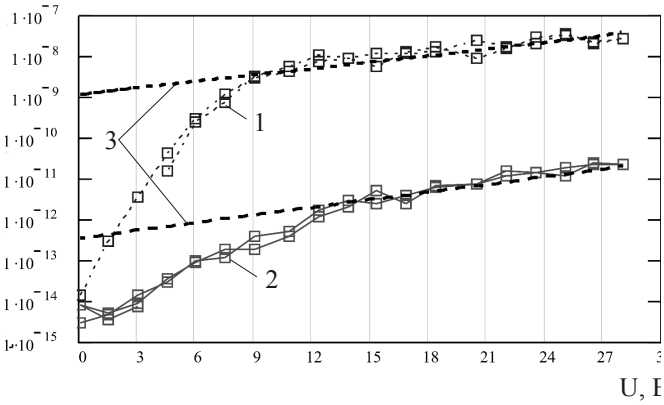


Рис. 4. Зависимости СПМ шума от напряжения смещения для образцов группы №2–кривая 1, №3 –кривая 2, аппроксимация экспоненциальной зависимостью – прямые 3 [18]

Активационно-дрейфовая модель позволяет объяснить особенности ВШХ на основе релаксационных процессов в ОПЗ полупроводниковых структур и создает предпосылки для практического применения методики анализа и прогнозирования параметров приборов по их вольт-шумовым характеристикам. Анализ и сопоставление опубликованных результатов показали, что форма ВШХ барьерных структур в большинстве опубликованных работ выглядит идентично: как кривая с резким начальным ростом, переходящая в участок насыщения. Анализ показал также, что зависимости СПМ шума от приложенного обратного электрического смещения имеют экспоненциальный характер. При построении в логарифмическом масштабе ВШХ состоят их двух практически прямолинейных участков с разными угловыми коэффициентами [14,18]. Начиная с определенного напряжения обратного смещения на барьер-

ном слое, происходит насыщение величины СПМ НЧ шума, аналогичное результатам, приведенным на рисунках 3,4.

Определенная напряженность поля создает условия для генерации с ГУ и дрейфа носителей заряда при пересечении глубокого уровня уровнем Ферми в ОПЗ барьерной структуры. Рост напряжённости поля приводит к тому, что увеличивается часть активированных с ГУ носителей, пролетевших слой ОПЗ, что, в результате, приводит к увеличению амплитуды шумовой составляющей обратного тока структуры.

Экспериментально обнаружено, что уровень НЧ шума полупроводниковых структур, изготовленных в едином технологическом цикле и расположенных в непосредственной близости друг от друга, может различаться на несколько порядков. При этом вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные (C-V) характеристики таких структур идентичны. В большинстве случаев формы вольт-шумовых характеристик подобны, различаются значения напряжения перехода от участка быстрого роста ко второму с медленным ростом и коэффициенты, характеризующие наклон каждого из участков [14]. Это говорит о более высокой, по сравнению с методами ВАХ и C-V, чувствительности, информативности и перспективности применения метода ВШХ для прогнозирования потенциально ненадежных структур и порогового уровня параметров полупроводниковых приборов.

Вопрос о величине напряженности электрического поля, приводящей к насыщению пролета активированных с ГУ носителей заряда, остается открытым. В работе [11] указано, что для получения достоверных данных о параметрах ГУ средняя напряженность поля в ОПЗ барьерной структуры должна быть не менее 10^4 В/см. В то же время средняя напряженность поля не должна превышать значения 10^5 В/см, при котором может наблюдаться, например, микроплазменный пробой. Остаётся не ясной зависимость τ_0 от напряжённости поля в ОПЗ. Экспоненциальные зависимости СПМ НЧ шума от напряженности электрического поля позволяют предположить возможность проявления одного из явлений в сильных полях - эффекта Френкеля-Пула. Указанные аспекты открывают перспективы дальнейших исследований.

Выводы

Изучение и моделирование зависимости СПМ НЧ шума от напряжения электрического смещения важно как в теоретическом, так и прикладном плане. Во-первых, такая зависимость позволит выяснить роль напряжённости электрического поля в формировании шумовой составляющей обратного тока барьерных структур, а во-вторых, точнее выбирать режим работы диода в схеме для минимизации шума.

Основным практическим применением результатов является возможность более точного расчета энергии ионизации ГЦ по спектральным характеристикам НЧ шума, а также экспресс-анализа барьерных структур на наличие и суммарную концентрацию электрически активных ГЦ по форме ВШХ.

Библиографический список

1. Жигальский Г.П., Холомина Т.А. Избыточные шумы и глубокие уровни в детекторах ядерных частиц и ионизирующего излучения на основе GaAs // Радиотехника и электроника. – 2015. – Т. 60. – № 6. – С. 553–581.
2. Ильичев Э.А., Кострюков С.А, Жигальский Г.П., Холомина Т.А., Литвинов В.Г. Избыточные шумы в GaAs детекторах ионизирующих излучений, геттерированных иттербием // Успехи современной радиоэлектроники. – 2014. – № 10. – С. 74-78.
3. McWhorter A.L. Semiconductor Surface Physics /Ed. R.H.Kingston. Philadelphia: University of Pennsylvania Press. – 1956. – P. 207.
4. Bell D.A. A survey of 1/*f* noise in electrical conductors // J. Phys. C. Solid State Phys. – 1980. – Vol. 13. – P. 4425-4437.
5. Бочков Г.Н., Кузовлев Ю.Е. Новое в исследованиях 1/*f* шума // УФН. – 1983. – Т. 141. – Вып. 1. – С. 151-176.
6. Жигальский Г.П. Флуктуации и шумы в электронных твердотельных приборах. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 512 с.
7. Jevtic M.M. Impurity concentration dependence of 1/*f* noise parameter α in silicon // Solid-State Electron. – 1988. – Vol. 31. – No. 6. – P. 1049-1052.
8. Vandamme L.K.J., De Werd H.M.M. 1/*f* noise model for MOST's biased in nonohmic region // Solid-State Electron. – 1980. – Vol. 23. – 4. P. – 325-329.

9. Hallgren R.B. Low-bias-noise spectroscopy of field-effect transistor channels: depletion-region trap models and spectra // Solid-State Electron. – 1990. – Vol. 33. – No 8. – P. 1071-1080.
10. Hsu S.T. Low-frequency excess noise in metal-silicon Schottky barrier diodes // IEEE Trans. Electron. Devices. – 1970. – Vol. ED-17. – No 7. – P. 496-506.
11. Oreshkin P.T. Barrier layers as resonators on deep centers //Phys. stat. sol. (a). –1991. –Vol. 123. – No. 2. – P. 483-491.
12. Холомина Т.А. Физический механизм нестационарной спектроскопии глубоких уровней и генерации низкочастотного шума в барьерных слоях //Изв. вузов. Электроника. – 1998. – №2. – С. 22-26.
13. Холомина Т.А. Влияние центров с глубокими уровнями на процессы генерации НЧ-шума в барьерах Шоттки // Изв. вузов. Материалы электронной техники. – 1998. – № 2. – С. 57-59.
14. Семенов А.Р., Холомина Т.А. Прогнозирование надежности полупроводниковых приборов по параметрам вольт-шумовых характеристик. СТНО-2016 – Труды международной научно-технической и научно-методической конференции. Том 2. – 2016 . – С. 212-218.
15. Huh J., Kim D.–C. et al. Low frequency noise in single GaAsSb nanowires with self-induced compositional gradients // Nanotechnology. – 2016. – Vol. 27. – No. 38. doi:10.1088/0957-4484/27/38/385703
16. Lu M.–P., Lu M.–Y., WangY.–J. Low-frequency electrical fluctuations in metal–nanowire–metal phototransistors // Nanotechnology. – 2015. – Vol. 25. – No. 28. doi:10.1088/0957-4484/25/28/285202
17. Характеристики детекторов ядерного излучения на основе полуизолирующего арсенида галлия / Е.М. 18. Вербицкая, В.К. Еремин, А.М. Иванов и др. // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38. – Вып. 4. – С. 490-497.
18. Кострюков С.А. Автореферат дис. канд физ.-мат наук. – Рязань. РГРГУ. – 2007. – 16 с.

УДК; ГРНТИ

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

А.С. Сапельников, Ю.В. Воробьев, Н.В. Вишняков, В.Г. Мишустин
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Российская Федерация, Рязань, sapelnikv-aleksandr@yandex.ru

Аннотация. В данной работе представлены результаты теоретических исследований и практических работ по созданию программно-аппаратного комплекса для измерения спектральной зависимости квантовой эффективности фотоэлектрического преобразователя. Для практической реализации комплекса использовано современное измерительное оборудование и программно - аппаратное обеспечение NI LabVIEW.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, солнечный элемент, квантовая эффективность, спектральная зависимость, программно-аппаратный комплекс

DEVELOPMENT OF HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR RESEARCH OF SPECTRAL DEPENDENCE OF THE PHOTOELECTRIC CONVERTER QUANTUM EFFICIENCY

A.S. Sapelnikov, Yu.V. Vorobyov, N.V. Vishnyakov, V.G. Mishustin
Ryazan State Radio Engineering University,
Russian Federation, Ryazan, sapelnikv-aleksandr@yandex.ru

Abstract. The results of theoretical studies and practical works on creation of hardware-software complex for measurement of spectral dependence of the quantum efficiency of the Photoelectric Converter are presented in this paper. For the practical implementation of the complex was used modern measuring equipment and software NI LabVIEW.

Keywords: photoelectric Converter, solar cell, quantum efficiency, spectral dependence, hardware-software complex

1. Введение

В настоящее время в связи с повышающимся уровнем загрязнения земной атмосферы двуокисью углерода, другими вредными продуктами техногенного происхождения и вызываемого ими потепления климата на нашей планете, применение известных, и разработка новых экологически чистых источников электрической энергии приобретают особое значение. Среди наиболее перспективных источников такого рода важное место занимают полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) солнечной энергии. Достоинством этих устройств является безотходность технологии преобразования энергии и относительно

простая конструкция, что позволяет использовать их в самых различных климатических условиях. К недостаткам ФЭП следует отнести зависимость от погодных условий (в пасмурные и дождливые дни, солнечная энергия не может служить основным источником электроэнергии), высокая стоимость из-за необходимости аккумулирования энергии и применения дорогостоящих и редких компонентов (выпуск тонкопленочных солнечных панелей требует введения теллурида кадмия (CdTe) или селенида меди индия галлия (CIGS)). Также к недостаткам ФЭП относят относительно низкие (в диапазоне 7-25% для серийного производства) значения коэффициента полезного действия. Повышение коэффициента полезного действия ФЭП связано с увеличением квантовой эффективности преобразования светового излучения в электрический ток. Этот параметр можно увеличить за счет новых конструктивных и технологических решений. В частности, для повышения эффективности преобразования солнечной энергии представляется привлекательным соединить в одном устройстве два (тандем) или более p-n переходов с тем, чтобы каждый из них работал с высокой эффективностью в определенном спектральном диапазоне светового излучения [1]. Кроме того, в последнее время бурное развитие получила так называемая HIT-технология (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) [2].

Из общих соображений ясно, что не каждый падающий фотон приводит к возникновению пары носителей заряда, создающих вырабатываемый СЭ ток. Частично излучение отражается от поверхности СЭ, часть поглощается безызлучательно. Также, не все возникшие носители заряда смогут добраться до электродов СЭ вследствие рекомбинации. Все эти процессы приводят к снижению эффективности использования светового излучения для выработки электрической энергии. Характеристикой эффективности с этой точки зрения является отношение числа носителей заряда, составляющих ток СЭ, к количеству квантов света, падение которых на поверхность СЭ привело к их возникновению. Эта характеристика и получила название «квантовая эффективность или эффективный квантовый выход». Немаловажной особенностью данной величины является возможность измерения ее спектральной дисперсии, показывающей эффективность преобразования излучения отдельных областей спектра и полноту использования солнечной энергии [3].

2. Квантовая эффективность и квантовый выход ФЭП

Под квантовой эффективностью (или эффективным квантовым выходом) понимается отношение числа зарегистрированных зарядов к числу попавших фотонов на светочувствительную область кристалла ФЭП. С понятием квантовой эффективности неразрывно связано такое понятие, как квантовый выход внутреннего фотоэффекта. Квантовый выход — это отношение числа фотоэлектронов, образовавшихся в активной области полупроводниковой структуры или вблизи ее границы в результате внутреннего фотоэффекта, к числу упавших на этот полупроводник фотонов. Квантовая эффективность или эффективный квантовый выход - это квантовый выход светочувствительной части фотопреобразователя, умноженный на коэффициент преобразования заряда фотоэлектрона в зарегистрированный полезный сигнал [2, 4]:

$$Q_{эфф} = \beta\gamma \ , \qquad (1)$$

где β - квантовый выход внутреннего фотоэффекта, определяемый числом пар электрон-дырка, создаваемых внутри полупроводника каждым поглощенным квантом за счет процесса фотоионизации; γ - эффективность собирания носителей (или, иначе, коэффициент разделения носителей) потенциальным барьером *p-n*-перехода, показывающая, какая часть из общего числа пар, созданных оптическим излучением, участвует в формировании тока короткого замыкания солнечного элемента при подключении внешнего регистрирующего прибора.

Поскольку этот коэффициент всегда меньше единицы, то квантовая эффективность также меньше квантового выхода. Из формулы (1) очевидно, что для определения квантовой эффективности ФЭП необходимо знать величину квантового выхода внутреннего фотоэффекта β и эффективность собирания фотогенерированных носителей заряда γ, создающих ток

во внешней цепи. Экспериментальное определение каждой из этих величин является самостоятельной и непростой задачей. В настоящей работе для измерения квантовой эффективности ФЭП предлагается применить подход, основанный на сравнении токов короткого замыкания исследуемого ФЭП с эталонным фотодиодом [5].

3. Теоретические основы процедуры измерения квантовой эффективности ФЭП

Для расчета квантовой эффективности ФЭП ($Q_{эфф}$) в первом приближении можно воспользоваться следующими допущениями и обозначениями:

1) поверхность ФЭП равномерно освещена монохроматическим световым потоком Ф;
2) отсутствует зависимость квантового выхода ФЭП от уровня освещенности;
3) плотность тока, вырабатываемого ФЭП, равна $\boldsymbol{j_ф}$.

По определению, квантовый выход β находится как:

$$\beta = \frac{Nc}{Np}, \tag{2}$$

где через *Nc* и *Np* обозначено число фотогенерированных носителей заряда и число падающих фотонов, соответственно [3].

Если за единицу времени число падающих фотонов и число носителей заряда остается постоянным**,** то возможен переход к использованию в вычислениях скоростей изменения этих величин:

$$\beta = \frac{dNc/dt}{dNp/dt}. \tag{3}$$

Освещенность можно представить как отношение светового потока Ф (мощности светового излучения), падающего на поверхность ФЭП, к величине ее площади S

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{dW/dt}{S} = \frac{d(Np \cdot h\nu)}{Sdt} = \frac{hc \cdot dNp}{\lambda \cdot S \cdot dt}, \tag{4}$$

где $\boldsymbol{W}$ - суммарная энергия квантов светового потока, $\boldsymbol{h}$ - постоянная Планка, $\boldsymbol{c}$ и $\boldsymbol{\lambda}$ - скорость и длина волны падающего монохроматического света.

Для плотности фототока ФЭП, по аналогии, можно записать следующее выражение:

$$j_ф = \frac{I}{S} = \frac{dQ/dt}{S} = \frac{e \cdot \gamma \cdot dNc}{S \cdot dt}, \tag{5}$$

где I - фототок, который генерирует ФЭП, Q - протекающий в нагрузке ФЭП электрический заряд.

Тогда из (3) - (5) после соответствующих очевидных преобразований получаем:

$$Q_{эф} = \frac{j_ф \cdot h \cdot c}{e \cdot \lambda \cdot E}. \tag{6}$$

В случае невыполнения допущения 1), т.е. при неравномерном распределением интенсивности излучения по площади ФЭП решение задачи несколько усложняется. При сохранении остальных допущений для отыскания квантовой эффективности в рассматриваемом случае можно разбить поверхность ФЭП на N малых площадей ΔS. Тогда фоточувствительная площадь S можно определить:

$$S = N\Delta S. \tag{7}$$

Если величина квантового выхода $\boldsymbol{\beta}$ постоянна по всей площади $\boldsymbol{S}$, то из (6) можно получить:

$$j_{\Phi i} = \frac{e\lambda}{hc} Q_{эфф} E_i , \qquad (8)$$

где E_i и $j_{\Phi i}$ - освещенность и плотность тока ФЭП в пределах i – ой площадки.

Тогда ток $\boldsymbol{I_i}$, собираемый i – ой площадкой, равен:

$$I_i = \frac{e\lambda}{hc} Q_{эфф} E_i \Delta S . \qquad (9)$$

Суммарный ток, вырабатываемый ФЭП, равен сумме токов, обеспечиваемых каждой из малых площадок:

$$I = \frac{e\lambda}{hc} Q_{эфф} \int E dS . \qquad (10)$$

Интеграл в правой части уравнения (10) представляет собой мощность, заключенную в световом пятне, которое освещает фоточувствительную область ФЭП. Поэтому окончательно для величины квантового выхода в рассматриваемом случае получаем

$$Q_{эфф} = \frac{h \cdot c \cdot I}{e \cdot \lambda \cdot \Phi} . \qquad (11)$$

Из (11) следует, что для экспериментального измерения $\boldsymbol{Q_{эфф}}$ нужно измерять ток, вырабатываемый ФЭП в ответ на освещение его поверхности монохроматическим источником, а также световой поток источника. Если измерение фототока не представляет принципиальных проблем, то измерение светового потока может происходить несколькими путями. В первом случае, в распоряжении экспериментатора должен быть прибор, непосредственно предназначенный для измерения светового потока или мощности излучения. Во втором случае, для измерения мощности может применяться эталонный фотодиод, имеющий известную характеристику своей спектральной чувствительности. Если она задана как зависимость мощности излучения от длины волны и выходного сигнала датчика, то эта зависимость используется для расчета Ф в формуле (11). Также эта зависимость может задаваться как спектральная дисперсия квантовой эффективности фотодиода $Q_{эффэт}$. В этом случае можно использовать (11) для получения значения светового потока, падающего на поверхность эталонного фотодатчика:

$$\Phi = \frac{h \cdot c \cdot I_{эт}}{e \cdot \lambda \cdot Q_{эффэт}} , \qquad (12)$$

где $\boldsymbol{I_{эт}}$ - ток в цепи эталонного фотодиода.

При подстановке (12) в формулу (13) можно вычислить значение квантовой эффективности для исследуемого ФЭП:

$$Q_{эфф} = Q_{эффэт} \cdot \frac{I}{I_{эт}} . \qquad (13)$$

Необходимо отметить, что фоточувствительная площадь эталонного фотодиода должна быть не меньше размеров светового пятна, используемого для измерения квантового выхода ФЭП.

4. Программно-аппаратный комплекс для измерения спектральной зависимости квантовой эффективности фотоэлектрического преобразователя.

Таким образом, из приведенных выше рассуждений следует, что для измерения спектральной дисперсии квантовой эффективности СЭ требуется следующее оборудование:

– стабильный источник белого света, перекрывающий интересующий участок спектра (солнечное излучение);

– сканирующий монохроматор, обеспечивающий работу в этом диапазоне;

– измеритель мощности светового излучения, например, эталонный фотодиод, рассчитанный на интересующие длины волн и уровни мощности;

– диафрагма, обеспечивающая локализацию светового пятна на поверхности исследуемого образца и измерителя мощности;

– светонепроницаемая камера с системой крепления образца;

– чувствительный амперметр.

При условии возможности компьютеризированного управления отдельными элементами, на их основе может быть собран единый измерительный комплекс.

Из перечисленных выше соображений была разработана функциональная схема устройства для исследования спектральной зависимости квантовой эффективности фотоэлектрического преобразователя, представленная на рисунке 1.

Свет от источника 1 попадает в монохроматор 9, где с помощью системы зеркал 2,3,5 делится на 2 луча. один из которых попадает на эталонный фотодиод 6, а другой - на исследуемый ФЭП 7. С помощью дифракционной решетки 4 меняется длина волны падающего на фотопреобразователи света. Фототок с обоих ФЭП попеременно через контакты электромагнитного реле 8 поступает на вход прецизионного микроамперметра 10, и с него по протоколу RS232 передается на персональный компьютер 12. Положением ключа 8 управляет ПК 12 через плату сбора данных NI USB – 6008. Более детально схема управления ключом представлена на рисунке 2.

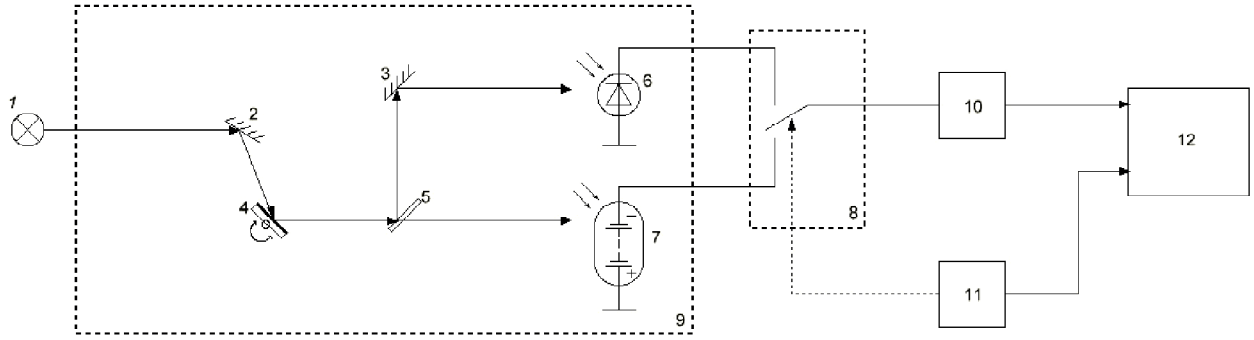


Рис. 1. Функциональная схема измерительного комплекса для исследования квантовой эффективности ФЭП: 1 – источник излучения; 2, 3 – непрозрачные зеркала; 4 – дифракционная решетка; 5 – дихроичное зеркало; 6 – эталонный фотодиод; 7 – исследуемый ФЭП; 8 – электромагнитное реле; 9 – монохроматор; 10 – пикоамперметр Keithley 6485; 11 – плата сбора данных NI USB – 6008; 12 – ПК с установленным ПО LabView 10

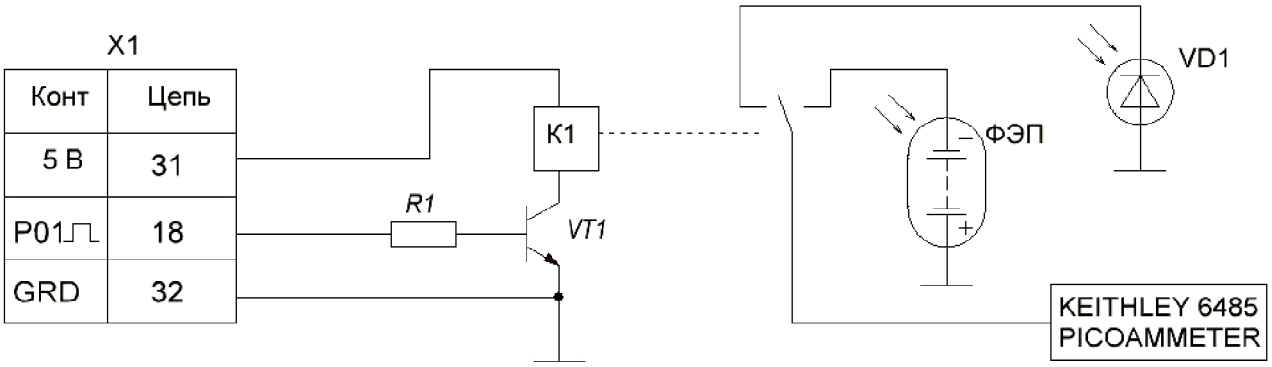


Рис. 2. Функциональная схема управления переключением измерительного канала: X1 – NI USB – 6008; K1 – электромагнитное реле РЭС 55А; R1 – резистор С2-29 (3К); VT1 – КТ315Б; VD1 – эталонный фотодиод; ФЭП – исследуемый экспериментальный образец

Выводы

В результате теоретических исследований и практических разработок была показана возможность использования эталонного фотодиода для оценки квантовой эффективности фотоэлектрических преобразователей, к которым можно отнести и солнечные элементы. Для практической реализации способа оценки квантовой эффективности разработана функциональная схема измерительного комплекса и выполнен его макет.

Авторы выражают глубокую благодарность доценту кафедры микро- и наноэлектроники РГРТУ, к.т.н. Мальченко С.И. за помощь в создании макета измерительного комплекса и его автоматизацию.

Библиографический список

1. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной энергетики. Физика и техника полупроводников. 2004, Т.38, вып.8. С. 937–948.
2. Wilfried G.J.H.M. van Sark , L. Korte, Fr. Roca Physics and Technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure Silicon Solar Cells// Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2012. 602 p. DOI 10.1007/978-3-642-22275-7
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн. 2. М.: Мир, 1984. – 456 с.
4. Чеботарев С.Н., Пащенко А.С., Лунина М.Л. Моделирование зависимостей функциональных характеристик кремниевых солнечных элементов, полученных методом ионно-лучевого осаждения, от толщины и уровня легирования фронтального слоя// Вестник Южного Научного Центра РАН Том 7, № 4, 2011, стр. 25–30.
5. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов. М.: Наука, 1985. – 280 с.

УДК 53.084.6, 53.084.872-876; ГРНТИ 29.19.31

РАЗРАБОТКА БЛОКА УСТАНОВКИ СПЕКТРОСКОПИИ НЧ ШУМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НИЗКООМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Д.С. Логинов, А.В. Ермачихин, А.Ю. Холомин, А.Р.Семенов
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, al.erm@mail.ru

Аннотация. Проведен анализ существующих методов реализации НЧ шумовой спектроскопии, а также разработка блока автоматизированной установки спектроскопии НЧ шума для исследования низкоомных объектов.

Ключевые слова: НЧ шум, шумовая спектроскопия, автоматизация, измерительная установка, LabVIEW.

DEVELOPING THE PART OF LF NOISE SPECTROSCOPY SYSTEM TO INVESTIGATE LOW-RESISTANCE STRUCTURES

D.S. Loginov, A.V. Ermachikhin, A.Yu. Kholomin, A.R. Semenov
Ryazan State Radioengineering University,
Russia, Ryazan, al.erm@mail.ru

Abstract. The analysis of the existing methods of low frequency noise spectroscopy is performed. The unit of an automated system realizing LF noise spectroscopy to study low-resistance structures is developed.

Keywords: LF noise, noise spectroscopy, automation, measurement system, LabVIEW.

1. Введение

В настоящее время существует ряд методов диагностики полупроводниковых структур:

1. контроль качества поверхности при помощи наведенного заряда;
2. контроль параметров интегральных схем (ИС) при пониженном напряжении питания;
3. контроль электрических параметров ИС в микротоковых режимах;
4. контроль качества ИС по критической величине дополнительного сопротивления в цепи питания;
5. выявление потенциально ненадежных ИС анализом формы динамического тока потребления в цепи питания;
6. отбраковка потенциально ненадежных ИС на биполярных структурах с помощью вольт-амперной характеристики (ВАХ).

Для анализа параметров полупроводниковых структур часто исследуют их вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики. Указанные исследования не занимают много времени и являются достаточно информативными. Перспективными в настоящее время являются методы диагностики, основанные на измерении параметров низкочастотного (НЧ) шума, в том числе с использованием внешних воздействий (электростатических разрядов, температуры, радиационного воздействия и др.).

Целью настоящей работы явился анализ существующих методов реализации НЧ шумовой спектроскопии, а также разработка блока автоматизированной установки спектроскопии НЧ шума для исследования низкоомных объектов.

Известны аналоговые и цифровые схемы реализации метода НЧ шумовой спектроскопии высокоомных объектов (обратно смещенных диодов Шоттки, несимметричных *p-n*-переходов, датчиков ионизирующего излучения и др.).

2. Аналоговый метод измерения

В работах [1,2] применялся аналоговый метод измерения спектральной плотности мощности шума с помощью анализатора спектра. В цифровом методе, который является более современным, анализ и обработка флуктуационных сигналов производится с помощью ЭВМ.

Структурная схема установки для измерения шумов аналоговым методом представлена на рисунке 1. Исследуемый шум детекторной структуры (образца) усиливается малошумящим предварительным усилителем с широкой полосой пропускания и поступает на анализатор спектра Я4С-68. Спектральную плотность мощности (СПМ) шума $S(f)$ исследовали в диапазоне частот 20 Гц – 60 кГц, полоса пропускания анализатора спектра составляла 3 Гц, 10 Гц и 30 Гц в зависимости от измеряемой частоты.

Перед началом измерений необходимо устранить внешние помехи и наводки, создаваемые внешними электромагнитными полями рассеяния. Для контроля формы сигнала, поступающего с предварительного усилителя, и обнаружения помех служил низкочастотный осциллограф С1-93.

Калибровка измерительного тракта производилась с помощью универсального генератора напряжения Г6-15, присоединенного к входу устройства. Напряжение смещения на образцах измерялось вольтметром ВУ-15.

Схема задания электрического смещения позволяла подавать на образец от 0 до 115 В. Питание схемы задания напряжения смещения осуществлялось несколькими источниками питания типа ТЕС-20, ТЕС-23, включенными последовательно.

Важнейшими блоками установки измерения шумов являются входное устройство и предварительный усилитель. Схема входного устройства должна обеспечивать:

1) возможность измерения спектральной плотности мощности (СПМ) шума в диапазоне частот 20 Гц-60 кГц;

2) максимальную чувствительность в указанном диапазоне частот;

3) возможность задания электрического смешения на исследуемый образец;

4) хорошую помехозащищенность по цепи питания.

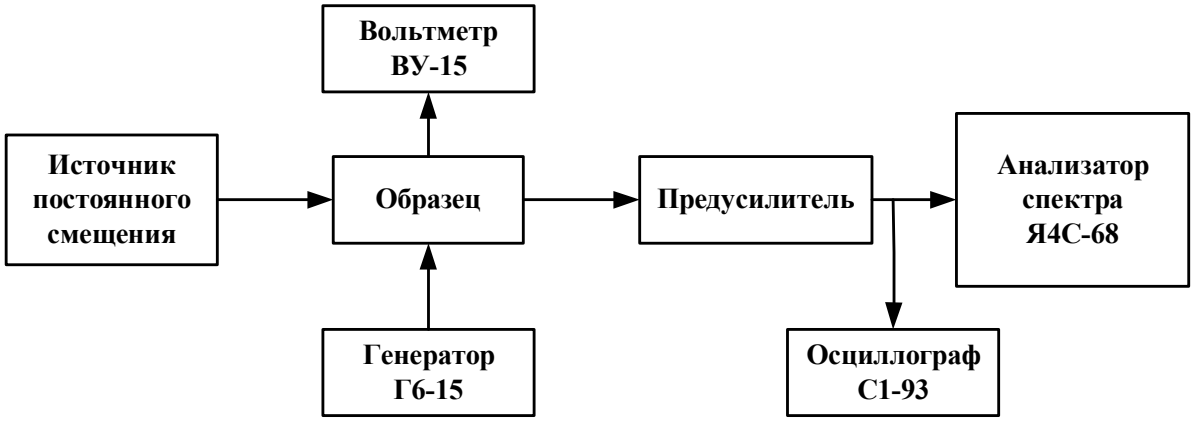


Рис. 1. Структурная схема для установки измерения СПМ шума в высокоомных образцах

Одно из основных требований, предъявляемых к входному устройству, – это низкий уровень собственных шумов и отсутствие помех сети от источника смещения. Схема входного устройства и задания смещения на образец R_x представлена на рисунке 2. Емкость $C_ф$ служит для фильтрации шумов источника питания ($C_ф$ = 30 мкФ). Сопротивление $R_{огр.}$ выбрано равным 10 МОм. Оно ограничивает ток, протекающий через структуру в случае ее

пробоя, и предотвращает шунтирование исследуемого образца емкостью $C_ф$. Предварительный малошумящий усилитель выполнен на полевых транзисторах 2П303А и питается от отдельного источника ($E_п$ = 11 В), собранного на гальванических элементах.

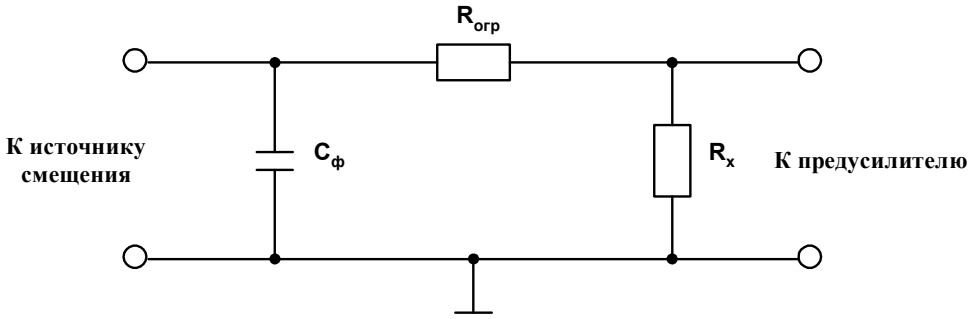


Рис. 2. Схема входного устройства

3. Аналого-цифровой метод измерения

В работах [3-5] разработана автоматизированная установка для измерения спектров НЧ шума с помощью ЭВМ. Применение цифровой техники для анализа характеристик НЧ шума представляется в настоящее время наиболее перспективным. Большинство настроек переносится в область программирования, что значительно упрощает эксплуатацию измерительной установки. Кроме того, цифровая техника даёт практически неограниченные возможности в сфере обработки и форме представления экспериментальных результатов. Однако, как и вся цифровая техника, ЭВМ является источником электромагнитного излучения в довольно широком спектре частот. Поэтому встаёт вопрос об уменьшении влияния помех, создаваемых ЭВМ, на результаты измерений. В работе предложен способ минимизации помех путём устранения гальванической развязки между чувствительными цепями установки и ЭВМ.

Функциональная схема разработанной установки представлена на рисунке 3. В состав измерительного комплекса входит ЭВМ типа IBM PC и внешний блок, обеспечивающий аналоговую обработку входного сигнала. ЭВМ и внешний блок связаны между собой через стандартный последовательный (USART) порт. В свою очередь внешний блок состоит из отдельно экранированных субблока малошумящего усилителя (МШУ) и субблока аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Субблок АЦП содержит фильтр низких частот 3-го порядка, собственно аналого-цифровой преобразователь разрядностью 10 бит, буферное ОЗУ и модуль гальванической развязки. На входе АЦП установлен пассивный RC-фильтр низких частот 3-го порядка с частотой среза 1800 Гц. Фильтр необходим для подавления во входном сигнале составляющих с частотами выше $f_д/2$, где $f_д$ – частота дискретизации АЦП.

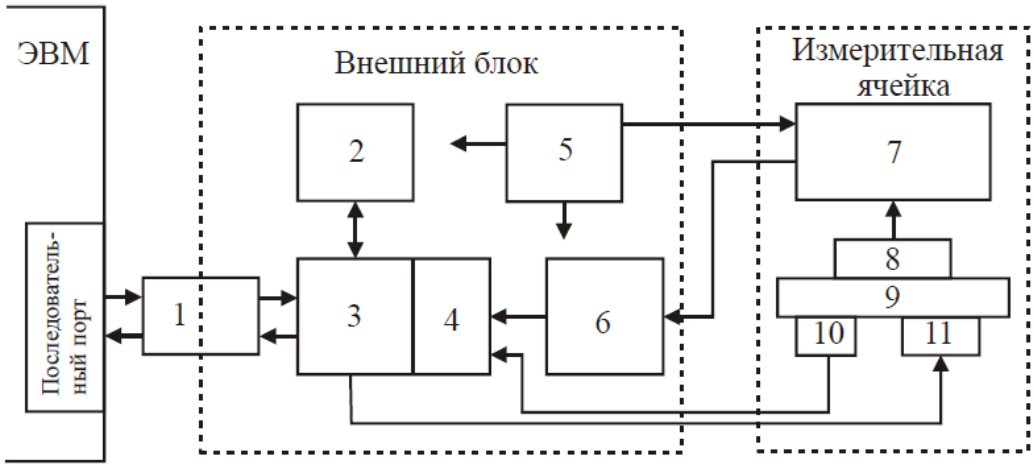


Рис. 3. Функциональная схема установки: 1-гальваническая развязка, 2-память (ОЗУ), 3-контроллер, 4-аналого-цифровой преобразователь, 5-источник питания, 6-буферный усилитель, 7-малошумящий усилитель, 8-образец, 9-держатель образца, 10-датчик температуры, 11-нагреватель [3,4]

Сигнал, поступающий с образца, усиливается, преобразуется в цифровую форму и сохраняется в буферной памяти. Таким образом, формируется выборка исследуемого сигнала. По команде с ЭВМ выборка передаётся в компьютер для математической обработки. После поступления выборки исследуемого сигнала (в нашем случае НЧ шума) в ЭВМ производится её математическая обработка, заключающаяся в вычислении СПМ входного сигнала как Фурье-преобразования от его автокорреляционной функции [5].

4. Установка шумовой спектроскопии низкоомных образцов

Схема установки, позволяющая исследовать низкоомные объекты, должна удовлетворять ряду особых требований по сравнению со схемами для высокоомных объектов. Наиболее существенными требованиями являются:

- необходимый диапазон рабочих частот усилителя: 20 Гц-60 кГц;
- надежное фильтрование системы питания усилителя;
- тщательное экранирование элементов схемы;
- отсутствие или сведение к минимуму помех и шумов, создаваемых разъемами и соединениями.

Для измерения СПМ НЧ шума был сконструирован автоматизированная установка, содержащая малошумящий усилитель, схему смещения напряжения с гальваническим источником питания и плату сбора данных NI PCIe 6361 с NI BNC 2120. Питание усилителя и подача напряжения смещения на образец происходят от гальванических источников питания для снижения влияния помех и наводок из электрической сети. Со схемы смещения подается напряжение на образец, усилитель (рис. 4) усиливает сигнал, и сигнал через платы NI PCIe 6361 с NI BNC 2120 заводится в ЭВМ, где и происходит обработка и хранение полученных данных. Установка постоянного напряжения смещения на образце происходит путем коммутации гальванических элементов по команде с ЭВМ через блок разъемов и коммутации NI BNC 2120.

На рисунке 4 представлена схема малошумящего усилителя, в котором для снижения уровня собственных шумов использовано параллельное включение 10 отдельных усилительных каскадов.

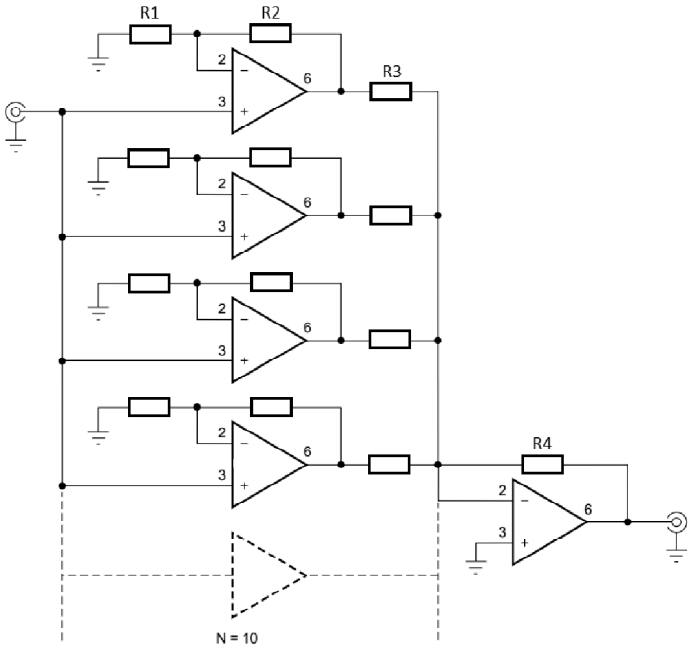


Рис. 4. Схема малошумящего усилителя напряжения с параллельными входами

Использование N параллельных каналов усиления позволяет снизить уровень собственных шумов в $\sqrt{N}$ раз. Недостатком такого решения является увеличение в N раз входной емкости и уменьшение в N раз входного сопротивления усилителя. Изменяя номиналы сопротивлений R1, R2, R3, R4, можно подобрать необходимый коэффициент усиления.

Оценим, как входное сопротивление влияет на напряжение теплового шума. Используя выражение СПМ теплового шума, получаем:

$$S_T(f) = 4kTR,\ S_T(f) = U^2/\Delta f,\ U^2 = 4kTR\Delta f,$$

$$\sqrt{U^2(R,T)} = 2\sqrt{1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot RT\Delta f}\ .$$

Графически зависимость напряжения теплового шума от значения сопротивления при фиксированной частоте показана на рисунке 5. Прямая линия – это напряжение теплового шума усилителя, остальные кривые являются напряжениями шума при разных температурах. Входной уровень шума усилителя равен 3,9 нВ/√Гц при 1 кГц.

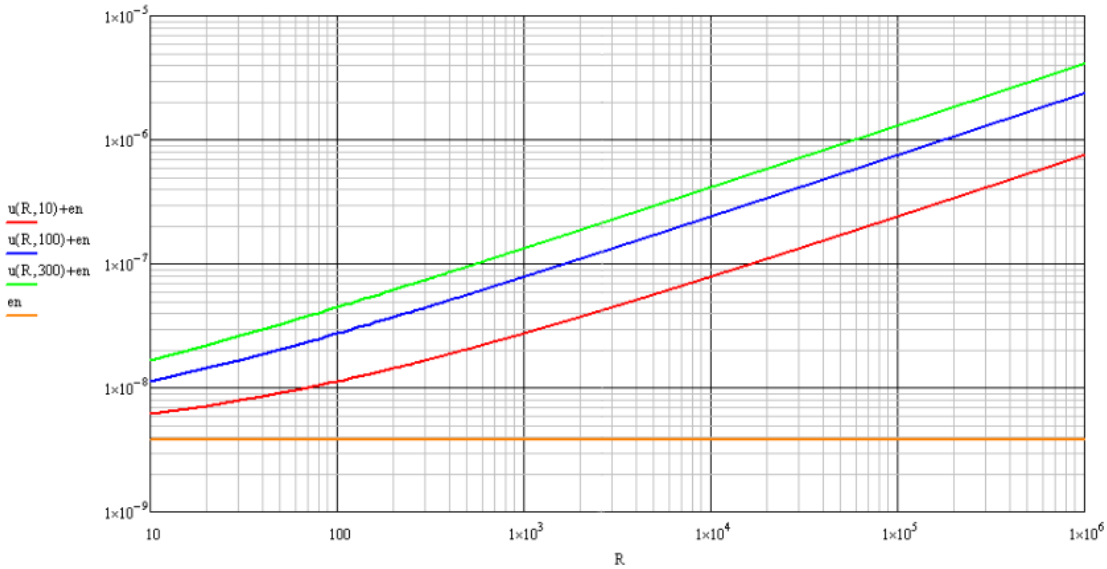


Рис. 5. Зависимость напряжения теплового шума от входного сопротивления

На рисунке 6 приведены шумы усилителя и измерительного канала при двух напряжениях на входе усилителя. Очевидно, что собственные шумы установки не зависят от источника напряжения смещения, подключаемого к образцу. «Пики» на частотах 50, 100 Гц и более высоких гармониках обусловлены паразитными наводками от сети переменного тока.

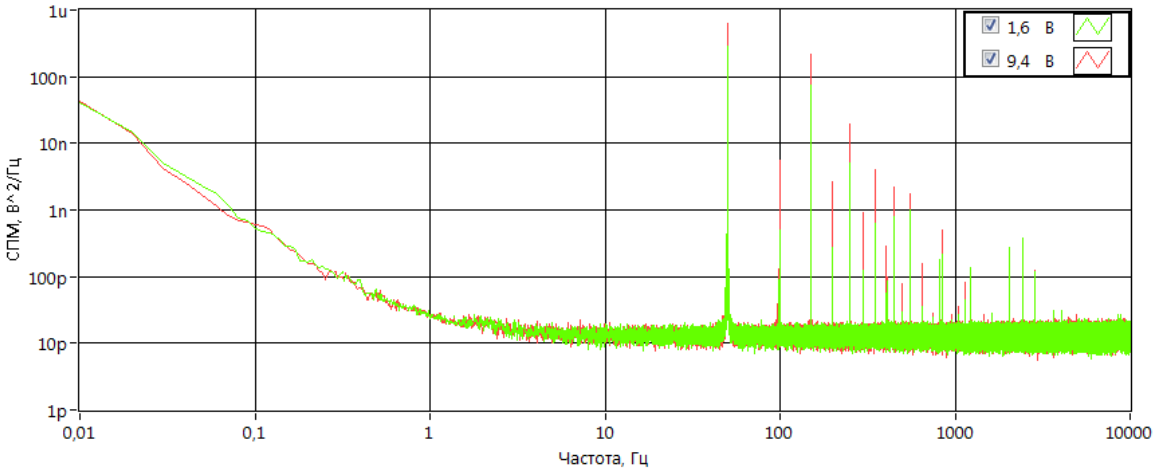


Рис. 6. Собственные шумы усилителя

Измерение спектров НЧ шума зачастую необходимо проводить при различных напряжениях смещения на образце, поэтому используется последовательная схема подключения образца к малошумящему источнику напряжения и эталонному сопротивлению (рис. 7). Эталонное сопротивление используется непосредственно для измерения спектров НЧ шума с

помощью малошумящего усилителя, платы сбора данных и специальной программы для ЭВМ, выполненной в среде LabVIEW.

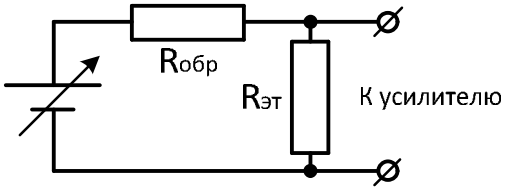


Рис. 7. Схема включения образца

При использовании последовательной схемы замещения необходимо установить взаимосвязь между величиной напряжения источника и падением напряжения на образце. Для этого необходимо найти динамическое сопротивление образца путем измерения его ВАХ. Подбирая величину $R_{эт}$ сопоставимой со значением сопротивления образца, можно проводить измерения СПМ шума объектов с низким сопротивлением.

Выводы

На первых этапах развития НЧ шумовой спектроскопии применялись аналоговые установки для измерения шума в высокоомных полупроводниковых барьерных структурах. Использование ЭВМ расширило возможности проведения эксперимента и хранения информации в электронном виде, увеличило скорость обработки полученных результатов.

Создание полностью автоматизированной установки позволило проводить эксперименты без непосредственного участия исследователя и исключить риск возникновения ошибки из-за человеческого фактора. Применение платы сбора данных NI PCIe 6361 с NI BNC 2120 и среды программирования NI LabVIEW позволило реализовать в одной программе весь цикл измерения, обработки и сохранения данных, а также визуализации полученных результатов на экране ЭВМ.

Рассмотрены аналоговый и аналого-цифровой методы измерений спектральной плотности мощности НЧ шума. Разработана установка для измерения НЧ шума в низкоомных образцах, приведены её характеристики. Проведено моделирование зависимости напряжения теплового шума от входного сопротивления.

Библиографический список

1. Куликов Е.И. Методы измерения случайных процессов. М.:Радио и связь. – 1986. – 272 с.
2. Соколик С.А., Гуляев А.М., Мирошникова И.Н. Совершенствование установки для исследования низкочастотного шума полупроводниковых приборов и структур // Измерительная техника. – 1997. – № 1. – С. 57-61.
3. Холомина Т.А., Кострюков С.А., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В. Спектроскопия низкочастотных шумов полупроводниковых приборов // Датчики и системы. – 2013. – №5. – С. 15-20.
4. Кострюков С.А ., Ермачихин А.В., Литвинов В.Г. ,Холомина Т.А., Рыбин Н.Б. Измерительный комплекс спектроскопии низкочастотных шумов полупроводниковых диодных структур // Измерительная техника. – 2013. – № 9. – С. 61-64.
5. Кострюков С.А., Холомина Т.А. Особенности анализа сигналов низкочастотного шума методом дискретного преобразования Фурье // Измерительная техника. – 2005. – №12. – С.47-50.

УДК ; ГРНТИ

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТЕКСТУРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

И.О. Кошкин, Н. Б. Рыбин
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Рязанская область, Рязань, ygrik13@yandex.ru

Аннотация. В работе приведены результаты исследования зависимости коэффициентов отражения и поглощения от структуры поверхности текстурированного кремния, предназначенного для создания солнечных элементов.

Ключевые слова: фотоэлектрические преобразователи, текстурированный кремний, коэффициент отражения.

REASERCH ON REFLECTION COEFFICIENT OF TEXTURED SILICON SURFACE

I.O. Koshkin, N.B. Rybin
Ryazan State Radio Engineering University
Russia, Ryazan, ygrik13@yandex.ru

Abstract. In this paper optical characteristics of silicon solar cells are investigated. Dependencies of reflection coeficient and absorption coeficient from different textured surface are shown.

Keywords: solar cells, textured silicon, relection coefficient.

1. Введение

В настоящее время все более активно используются фотоэлектрические преобразователи (солнечные элементы) для получения энергии. Использование солнечной энергии для получения электричества имеет ряд преимуществ: не требует топлива, работает постоянно, бесшумность процесса получения энергии, длительный срок безаварийной службы, надежность (в ФЭП на кристаллическом кремнии), общедоступность, возможность произвольного изменения мощности системы, экологичность.

Однако повсеместное внедрение фотоэлектрических преобразователей ограничено (сниженная производительность солнечных батарей в зимнее время, низкая эффективность для использования в отопительных системах, высокая себестоимость и др.). Эти ограничения, связанные с физикой работы фотоэлектрических преобразователей, необходимо преодолевать.

Для улучшения характеристик фотоэлектрических преобразователей применяются различные способы: применение новых материалов [1] и структур, повышение коэффициента поглощения с помощью нанесения противоотражающих покрытий, текстурированные поверхности [2].

Абсолютный предельный КПД фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии на основе монокристаллического кремния составляет 25–27 %. Максимальное значение КПД кремниевого солнечного элемента получают в кремниевой структуре с поверхностным рельефом в виде пирамид, покрытых слоем окисла оптимальной толщины ("текстурированная" поверхность). Эффективность такого солнечного элемента, выпускаемого компанией Kyocera (Япония), достигает 17,7%, квантовая эффективность прибора аналогичной конструкции компании Sharp – 19,0% [3].

Эффективный нанокристаллический материал – пористый кремний, стенки пор которого представляют собой систему неупорядоченных нанокристаллов. Проблему высокого электрического сопротивления пористого кремния удается решить за счет локального порообразования на текстурированной поверхности [3].

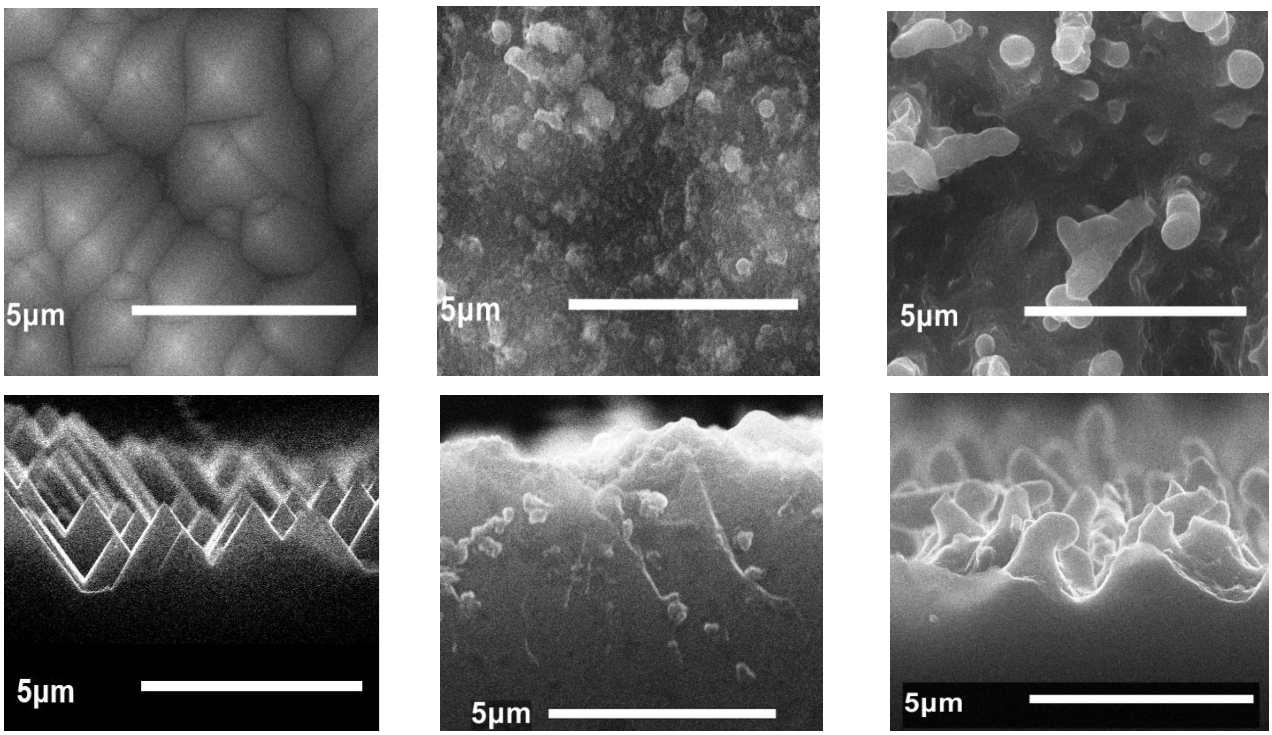
Кроме того, локальное текстурирование пористого кремния позволяет изготавливать фоточувствительные кремниевые структуры с расширенным в коротковолновую область спектральным диапазоном чувствительности и хорошими фотоэлектрическими свойствами [3].

2. Исследование коэффициента отражения текстурированного кремния

Во многих практических приложениях возникает необходимость уменьшения коэффициента отражения от границы между двумя средами. В солнечной энергетике уменьшение отражения от фотоэлемента позволяет существенно увеличить его КПД.

В данной работе проведено исследование коэффициента отражения текстурированной поверхности монокристаллического кремния. Текстурирование поверхности пластин Si водилось методом жидкостного химического травления. Для изменения структуры поверхность образцов была обработана лазером удельной мощностью 1 Вт/см^2.

Изображения структуры поверхности образцов были получены с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Jeol JSM-6610LV в режиме вторичных электронов, при ускоряющем напряжении 30 кВ. РЭМ-изображения поверхности образцов представлены на рисунке 1.



а б в

Рис. 1. РЭМ-изображения поверхности текстурированного кремния: а) - без лазерной обработки; б) - поверхность кремния после первой лазерной обработки; в - поверхность кремния после второй лазерной обработки

Исследования коэффициента отражения поверхностей, приведенных выше, проводились с помощью спектрофотометра СФ-56, оснащенного приставкой диффузного отражения ПДО-6. Зависимости коэффициента отражения поверхности текстурированного кремния от длины волны излучения, приведенные на рисунке 2. Из рис. 2 видно, что коэффициент отражения текстурированного кремния без обработки в видимом диапазоне составляет 17-30%, после первой обработки от 8 до 15 %, после второй – от 5 до 14 %.

Так как в видимом диапазоне длин волн коэффициент пропускания кристаллического кремния T = 0 %, то можно записать:

$$\alpha = 1 - R, \qquad (1)$$

где α – коэффициент поглощения, R – коэффициент отражения. Зависимость коэффициента поглощения от длины волны приведена на рисунке 3.

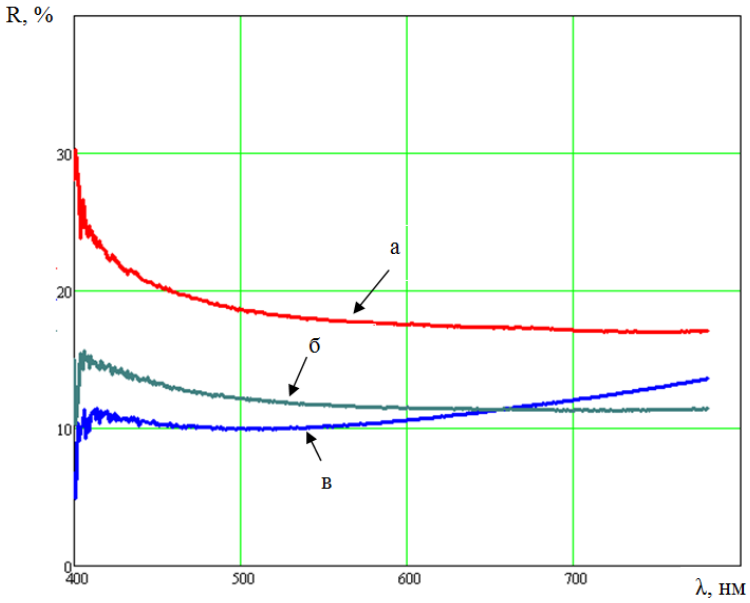


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения текстурированного кремния от длины волны излучения: а) кремний без обработки; б) кремний после первой обработки; в) кремний после 2 обработки

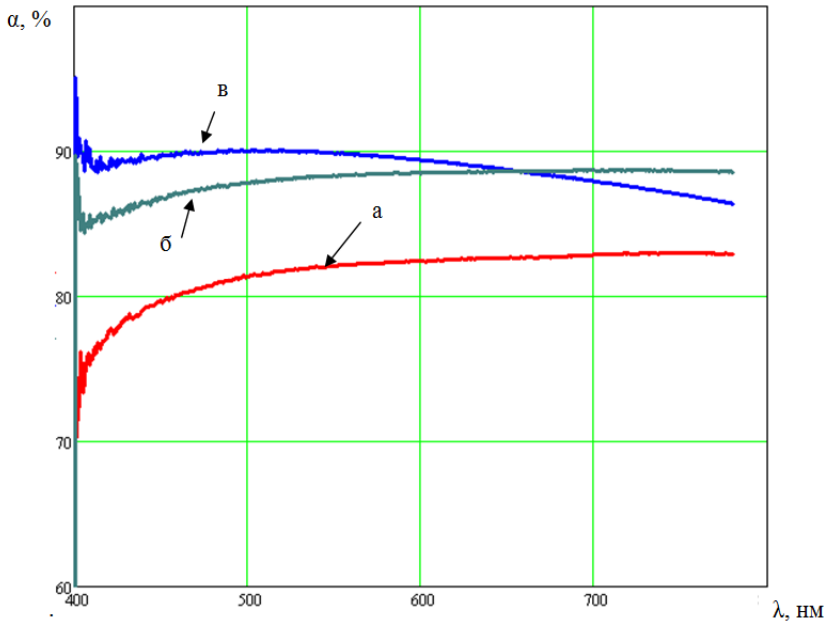


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения текстурированного кремния от длины волны излучения, здесь: R – коэффициент отражения; а) кремний без обработки; б) кремний после первой обработки; в) кремний после 2 обработки

Выводы

Коэффициент отражения текстурированного кремния без обработки в видимом диапазоне составляет 17-30%, после первой обработки от 8 до 15 %, после второй – от 5 до 14 %, т. е. после обработки коэффициент отражения падает в среднем в два раза. При этом у поверхности текстурированного кремния после первой обработки коэффициент отражения в диапазоне длин волн от 400 до 650 нм больше, чем у образца после второй обработки, в диапазоне длин волн от 650 до 800 нм наблюдается обратная зависимость.

Таким образом, благодаря лазерной обработке коэффициент поглощения текстурированного кремния увеличивается, что положительно скажется на КПД конечного фотоэлектрического преобразователя.

Библиографический список

1. Буравлев А.Д., Безнасюк Д.В., Гильштейн Е.П. и др. Исследование фотоэлектрических свойств массивов нитевидных нанокристаллов GaAs :Be. // Физика и техника полупроводников, 2013. Том 47. Вып. 6. С. 797-801.
2. Унтила Г.Г., Палов А.П. и др. Моделирование оптических свойств кремниевых солнечных элементов, текстурированных V-образными проникающими канавками. // Физика и техника полупроводников, 2011. том 45. Вып. 10. С. 1410-1416.
3. Латухина Н., Чепурнов В., Писаренко Г. Новые перспективы старых материалов: кремний и карбид кремния // Электроника НТБ, 2013. Вып. 4. С. 104-110.

УДК ; ГРНТИ

ИЗМЕРИТЕЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В.Г. Литвинов, В.О. Шубаркин, В.В. Гудзев
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, 7zmei9@mail.ru

Аннотация. В данной работе описан измерительно-аналитический комплекс для исследования свойств полупроводниковых материалов и структур для фотоэлектрических преобразователей. Приведено краткое описание установки и получаемых параметров.

Ключевые слова: измерительно – аналитический комплекс, фотоэлектрический преобразователь, полупроводник.

MEASURING COMPLEX FOR RESEARCH OF SEMICONDUCTOR MICRO- AND NANOSTRUCTURES FOR PHOTOVOLTAIC CONVERTERS

V. Litvinov, V. Shubarkin, V.V. Gudzev
Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, 7zmei9@mail.ru

Abstract. In this paper the implementation of measuring and analytical complex for studying the properties of semiconductor materials and structures for photovoltaic converters is described. A brief description of the installation and the resulting parameters are presented.

Keywords: measuring and analytical complex, photovoltaic converter, semiconductor.

Введение

В связи с высоким спросом на фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) и растущими объемами выпуска возникает необходимость изучения и контроля их параметров и характеристик, непосредственно влияющих на коэффициент полезного действия солнечного элемента. Барьерные структуры и полупроводниковые материалы, использующиеся для изготовления солнечных элементов (СЭ) неизбежно имеют дефекты, образующие глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводникового материала (ГУ) или глубокие центры (ГЦ). Дефекты или ГЦ, влияют на эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую. Поэтому влияние ГУ необходимо учитывать и исследовать при создании солнечных батарей.

Наиболее оптимальным решением задачи контроля параметров и свойств материалов для фотоэлектрических преобразователей является создание специализированного измерительно-аналитического комплекса. Получение широкого ряда характеристик контролируемой структуры позволяет сформировать данные о ее достоинствах и недостатках. ГЦ в полупроводниковых барьерных структурах традиционно исследуются известным методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) известным также в англоязычной аббревиатуре как DLTS [1]. ФЭПы имеют ряд специфических особенностей, что делает затруднительным или невозможным использование традиционных методов диагностики жестких требований к параметрам исследуемых образцов. Традиционный метод DLTS применяется для исследования образцов с барьерной емкостью в диапазоне примерно 1 – 1000 пФ с пренебрежительно малыми токами утечки. ФЭПы или СЭ обладают достаточно большой площадью, следовательно, достаточно большой барьерной электрической емкостью и высокими токами утечки. В связи с этим представляет интерес разработка измерительно-аналитического комплекса, позволяющего изучать параметры и характеристики ФЭПов с учетом их особенностей.

Параметры ФЭП и состав измерительно-аналитического комплекса.

Разработанный комплекс включает в себя исследование характеристик материалов и структур такими методами, как измерение I-V, C-V характеристик, спектров токовой DLTS или I-DLTS.

Метод вольт-амперных (I-V) характеристик позволяет измерять ток короткого замыкания I_{sc}, протекающий через СЭ, когда напряжение равно нулю (то есть когда СЭ замкнут накоротко). Поскольку этот ток зависит от площади СЭ, поэтому вместо тока короткого замыкания рассматривают плотность тока короткого замыкания J_{sc}.

$$J_{sc}=qG(L_n+L_p), \quad (1)$$

где G – скорость генерации, L_n и L_p – диффузионная длина электронов и дырок соответственно, q – элементарный заряд. В уравнении (1) приняты некоторые допущения, но оно показывает, насколько сильно зависит ток короткого замыкания от скорости генерации и диффузионной длины носителей заряда (НЗ) [2].

Кроме этого метод позволяет измерять напряжение холостого хода V_{oc} или максимальное напряжение, создаваемое СЭ, возникающее при нулевом токе. Оно соответствует прямому смещению p-n перехода при появлении светового потока:

$$V_{oc}=(kT/q)\ln((I_L/I_o)+1), \quad (2)$$

где I_o – ток насыщения, I_L – световой ток, n – коэффициент идеальности, k – постоянная Больцмана, T – температура.

Коэффициент заполнения FF определяется из I-V характеристики как отношение максимальной мощности СЭ к произведению тока короткого замыкания и напряжения холостого хода, является мерой квадратичности I-V характеристики:

$$FF=V_{MP}\cdot I_{MP}/V_{oc}\cdot I_{SC}, \quad (3)$$

где V_{MP} - напряжение в максимальной точке мощности, I_{MP} – ток в максимальной точке мощности. На практике значение коэффициента заполнения меньше единицы вследствие влияния паразитных сопротивлений.

Коэффициент полезного действия η определяется как отношение мощности СЭ к мощности падающего солнечного излучения:

$$\eta = V_{oc}\cdot I_{SC}\cdot FF/P_{in}, \quad (4)$$

где P_{in} – мощность падающего излучения [2]. Также необходимо учитывать интенсивность и спектр излучения.

Метод вольт-фарадных (C-V) характеристик позволяет измерять концентрацию легирующей примеси, плотность поверхностных состояний. Плотность поверхностных состояний необходимо стремиться снижать из-за уменьшения времени жизни НЗ вследствие возникновения дефектов кристаллической решетки.

Метод I-DLTS используется для определения параметров ГЦ: энергии активации, сечения захвата, концентрации. В методе I-DLTS проще реализовать компенсацию тока утечки, что позволяет исследовать структуры, не пригодные для изучения традиционным методом емкостной DLTS [3].

Дефекты структуры захватывают и испускают НЗ и ведут себя как электрически и(или) оптически активные центры, взаимодействуют между собой и с электронными состояниями материала, влияют в конечном итоге на коэффициент полезного действия СЭ [3]. В таблице 1 представлен перечень методик, параметров и характеристик ФЭПа, которые позволяет реализовать и измерять разработанный измерительный комплекс.

Для решения ряда задач по исследования материалов для ФЭП существует необходимость в проведении экспериментов в различных температурных диапазонах. В качестве измерительной ячейки используется гелиевый криостат замкнутого типа Janis CCS-400/204N с температурным диапазоном 7-500 К.

Для измерения I-V характеристик используется мультиметр Tektronix DMM 4020. Для получения данных о C-V характеристике применяется RLC-метр Agilent E4980A, позволяющий осуществлять измерения иммитанса в диапазоне частот 20 Гц – 2 МГц, диапазоне напряжений смещения 0 – 40 В.

Таблица 1 - Методики, параметры и характеристики ФЭПа

Метод	Параметр ФЭП
I-V	Ток короткого замыкания J_{sc}, напряжение холостого хода U_{oc}, коэффициент заполнения FF, коэффициент полезного действия η
C-V	Концентрация легирующей примеси, плотность поверхностных состояний
I-DLTS	Концентрация глубоких уровней, энергия активации, сечение захвата

В соответствии с методами исследования и оборудованием на рисунке 1 ниже представлена блок-схема разработанного измерительного комплекса. Импульсный генератор Tektronix AFG-3102 и преобразователь ток-напряжение (I-V) используются для реализации метода I-DLTS. I-V преобразователь разработан специально для работы с повышенными токами релаксации до 100 мА, что позволяет исследовать спектры ГЦ в ФЭПах. Измерительная ячейка адаптирована для помещения в нее образцов размерами до 160x160 мм^2. Все приборы в комплексе подключены к шине управления GPIB. Релаксационный сигнал напряжения с I-V преобразователя подается для оцифровки в аналого-цифровой преобразователь (АЦП) платы сбора данных NI PCIe-6361. Управление приборами, реализация методик, сбор, анализ

и хранение данных осуществляется в ЭВМ в среде инженерного графического программирования LabVIEW.

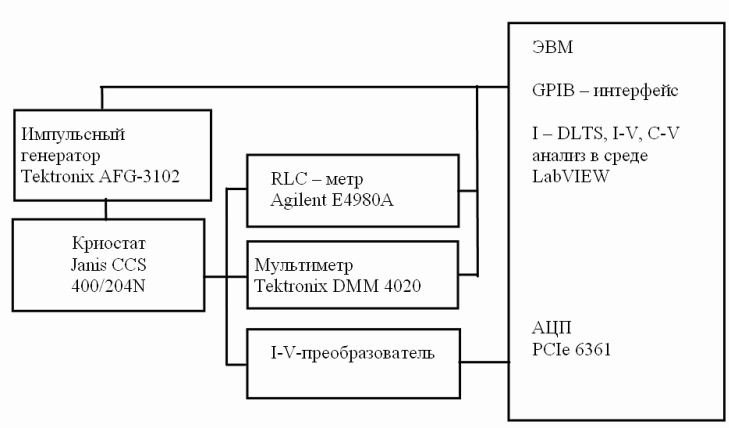


Рис.1. Блок-схема измерительно-аналитического комплекса с I-DLTS, C-V и I-V методами

Выводы

Наиболее эффективным решением задачи контроля свойств материалов для создания ФЭП является использование разработанного измерительно-аналитического комплекса. Благодаря указанным методам исследования пользователь получает полную картину характеристик исследуемого ФЭПа. Использование измерительной ячейки Janis CCS-400/204N исключается нежелательные внешние воздействия на образец, что максимально уменьшает погрешность при получении различного рода зависимостей.

Для каждого элемента комплекса представлено краткое описание и приведена блок-схема всего измерительно-аналитического комплекса. Возможность регулировки режимов измерения позволяет подстроиться под любой тип материалов, которые в последующем будут использоваться для создания полупроводниковых приборов.

Библиографический список

1. D.V. Lang, “Deep level transient spectroscopy: a new method to characterize traps in semiconductors,” J. Appl. Phys., Vol. 45, pp. 3023-3032, 1974.
2. Параметры солнечного элемента [Электронный ресурс], URL: http://ust.su/solar/media/section-inner14/1587 (дата обращения 12.02.2017).
3. Litvinov V.G., Vishnyakov N.V., Gudzev V.V., Mishustin V.G., Karabanov S.M., Vikhrov S.P., Karabanov A.S. Measuring Complex for Analysis of Recombination Deep Traps in Semiconductor Solar Cells // Power Electronics and Renewable Energy Conversion, 2015. pp. 1071-1074.

УДК 629.7.064.56; ГРНТИ 444135

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ

Д.Г. Тюнин, Н.М. Толкач
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, rgrtu@rsreu.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности и результаты применения методов лазерной обработки фотоэлектрических преобразователей, их влияние на эффективность солнечного модуля.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, солнечный модуль, лазерная обработка, повышение КПД солнечного элемента, солнечная энергетика.

APPLICATION OF LASER TECHNOLOGIES FOR INCREASE EFFICIENCY OF SOLAR MODULES

D.G. Tyunin, N.M. Tolkach
Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, rgrtu@rsreu.ru

Abstract. The features and the results of the application of laser processing methods of photovoltaic converters, their influence on the efficiency of the solar module are considered in the article.
Keywords: photovoltaic converter, solar module, laser processing, increase efficiency of solar module, solar energetics.

1. Введение

Миллионы лет Земля копила в своих недрах энергию, получаемую от солнечных лучей, чтобы человечество смогло воспользоваться этим даром для своего развития. Но только в процессе «взросления» человечеству пришло осознание того, что эффективней и быстрей получать энергию непосредственно от солнечных лучей, нежели ждать пока она запасётся в недрах и преобразуется в доступные к разработке ресурсы. Солнце – чистый и неиссякаемый источник энергии на Земле в нашем обозримом будущем. Для получения электричества из солнечного света не нужно загрязнять атмосферу выбросами вредных газов, не нужно беспокоиться о том, что в ближайшие несколько десятков-сотен лет мощность солнечного излучения уменьшится. Эти преимущества дают толчок развитию солнечной энергетики как одному из направлений альтернативной энергетики, работающей на возобновляемой ресурсной базе. Экологичность и неисчерпаемость дают солнечной энергетике неоспоримое преимущество перед такими «классическими» источниками энергии как уголь, нефть, газ, атом. К сожалению, технологии солнечной энергетики не совершенны, и добиться полного преобразования энергии фотонов, летящих от солнца, в полезную энергию на данном этапе развития науки и техники не представляется возможным.

История создания солнечных элементов началась в 1839 году с открытия Беккерелем фотовольтаического эффекта, и создания им химической батареи, которая под воздействием солнца вырабатывала электричество и имела КПД 1%. В 1888 году Столетов сформулировал основные законы преобразования света в электрический ток и создал первую солнечную ячейку. В 1954 году Пирсон, Чапин и Фуллер произвели кремниевый солнечный элемент, имеющий КПД уже 4%. В 1963 году компанией Sharp была реализована концепция солнечной панели. В дальнейшем эффективность ячейки была повышена до 15-16%. На данный момент в лабораторных условиях удалось достичь КПД прямого преобразования солнечной энергии в электрическую от 34 до 45%. Важнейшей задачей солнечной энергетики является повышение КПД фотопреобразования. Теоретический КПД фотоэлектрического преобразования солнечной энергии, по данным академика Алфёрова, составляет 87% [1].

2. Методы лазерной обработки фотоэлектрических (ФЭП) преобразователей

Современные технологии лазерной микрообработки позволяют контролировать и изменять в широких пределах длительность, форму и мощность лазерного импульса, что позволяет реализовывать широкий спектр применений [2].

Повышение эффективности солнечного модуля (СМ) с помощью методов лазерной обработки достигается несколькими способами:

1) повышение производительности заводской линии за счет изменения скорости сканирования и изменения частоты импульсов лазерного излучения, уменьшения количества проводимых технологических операций;

2) улучшение качества обработки ФЭП путем уменьшения времени импульса лазерного излучения;

3) увеличение полезной площади СМ за счет уменьшения ширины линий разметки;

4) преобразование формы пучка лазерного излучения с применением дифрактивных элементов;

5) лазерная модификация слоев ФЭП с изменением структур и фаз.

Изменение скорости сканирования и частоты импульсов лазерного излучения

Повышение эффективности производства СМ за счет уменьшения количества операций и их ускорения, непосредственно влияет на конечную стоимость модуля и, как следствие, эффективность СМ. Таким образом, внедрение лазерных технологий в производственную сферу солнечной энергетики положительно сказывается на повышении эффективности,

поскольку увеличение частоты следования импульсов и скорости сканирования луча лазера по поверхности повышают производительность обработки.

Уменьшение времени импульса лазерного излучения

При изготовлении тонкопленочных СМ большой площади необходимо разделять модуль на отдельные ячейки для повышения выходного напряжения и уменьшения электрических потерь [3]. Эта операция осуществляется при помощи технологии лазерного скрайбирования. Лазерное скрайбирование – это основанный на взаимодействии лазерного излучения с удаляемым веществом процесс создания резов на поверхности обрабатываемого материала, выполняющих роль либо коммутирующих, либо изолирующих соединений. В основе лазерного скрайбирования лежит эффект лазерной абляции – результат взаимодействия вещества и лазерного излучения, которое приводит к испарению материала. В результате перемещения пучка по поверхности материала образуется канавка. При правильно подобранных параметрах излучения практически отсутствуют механические повреждения в прилегающих к ней областях.

Одной из задач при производстве СМ является снижение теневого эффекта от системы контактов, выступающих над поверхностью подложки. Поэтому контакты полезно заглублять в поверхность подложки или убирать на заднюю поверхность ФЭП. В обоих случаях необходимо создавать строго контролируемые по геометрическим параметрам канавки, с чем успешно справляются при помощи лазерных методов обработки.

Уменьшая длительность импульса лазерного излучения с высокой плотностью энергии, можно добиться того, что малый объем материала будет испарен за время, меньшее чем то, которое требуется, чтобы тепло из зоны облучения успело распространиться в прилегающие области. Таким образом, используя ультракороткие импульсы лазерного излучения, можно улучшить качество обработки. График зависимости глубины абляции кремния от частоты воздействия лазерного излучения показан на рисунке 1.

За счёт использования ультракоротких лазерных импульсов обеспечивается высокий уровень вводимой энергии в поглощающий материал, в связи с чем испарение слоёв происходит без воздействия на остальной материал [5]. Выбор правильной длины волны излучения важен для сохранения энергетического взаимодействия в заданном объеме на границе прослойки, и это может быть способом достижения селективного удаления слоев даже в случае обработки со стороны удаляемого материала, который является единственным подходящим для создания солнечных батарей на гибкой основе. Использование ультракоротких импульсов позволяет обеспечить высокую производительность лазерного скрайбирования для тонкоплёночных солнечных элементов и исключить последствия от теплового воздействия на области, прилегающие к резу [6].

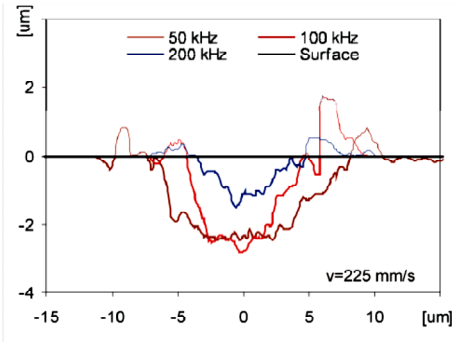


Рис. 1. Воздействие наносекундного лазерного излучения на кремний (перекрывание импульсов 80%90%) [4]

Особенности обработки микрообластей прозрачных токопроводящих слоёв, входящих в состав СМ, с помощью наносекундных лазерных импульсов Nd:YAG лазера довольно подробно изучены [7]. Испарение плёнок аморфного кремния (α-Si) и плёнок оксида индий-олово (ITO) различных толщин достаточно легко осуществляется с использованием излучения (KrF 248 нм; DPSS 355 и 1064 нм) лазерных источников с наносекундной длительностью

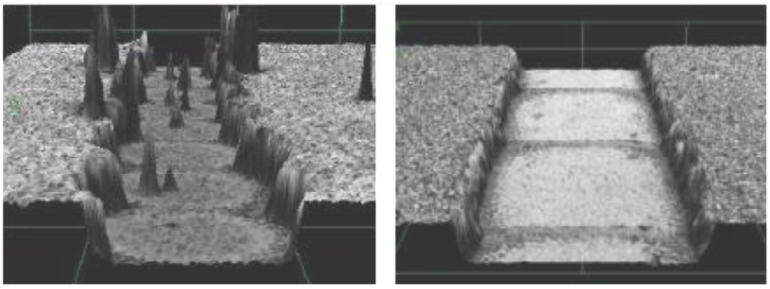
импульса. Эти результаты, а также многочисленные схожие публикации закрепили на практике идею использования селективной лазерной абляции ITO на стекле и α-Si на ITO.

Уменьшение размера пучка лазерного излучения

Так как области СМ, покрытые разметкой, не принимают участия в преобразовании солнечной энергии, целесообразно сокращать их площадь. Уменьшить зону обработки позволяет использование фокусирующих систем. Однако минимальная ширина реза определяется электрическими свойствами слоев, так как необходимо обеспечить отсутствие электрического пробоя между малыми промежутками. При работе с очень малыми расстояниями становится важно избегать негативных с точки зрения работы ФЭП моментов, например, туннельных пробоев.

Преобразование формы пучка лазерного излучения

Оригинальным и эффективным способом обработки поверхности оказалось использование импульсов лазерного излучения не круглого, а квадратного поперечного сечения [8]. Использование традиционных пучков, обладающих Гауссовым распределением энергии по сечению пучка, недостаточно эффективно, поскольку максимальная мощность сконцентрирована в центре пятна, что приводит к искажениям теплового фронта при обработке. Так как пленки равномерны и постоянны по своим теплофизическим свойствам, целесообразным является использование пучков поперечного квадратного сечения (таким образом уменьшается площадь перекрытия пучков и одновременно с этим увеличивается производительность для случая импульсной обработки). Выравнивание же энергетического сечения пучка позволяет повысить равномерность удаления материала по всей площади, попадающей в зону обработки и, как следствие, снизить краевые дефекты, что показано на рисунке 2.



а б

Рис. 2. Результаты использования гауссового луча и квадратного луча:
а – CdTe скрайбируется с гауссовым распределением интенсивности лазерного излучения,
б – α-Si обрабатывается с квадратным профилем распределения лазерного излучения [9]

Лазерный луч квадратной формы создает резы со значительно более прямыми боковыми стенками, чем гауссов пучок и, как следствие, меньшим количеством дефектов. При таком профиле луча резы можно располагать на близких расстояниях (отсутствуют негативные эффекты шунтирования удалённым материалом, вырванным в результате микровзрыва, но не испарившимся из слоя) и тем самым уменьшать площадь, занимаемую лазерной разметкой.

Лазерная модификация слоёв ФЭП

Перспективное направление методов лазерной обработки – модификация слоёв ФЭП, входящих в состав тонкоплёночного СМ.

Воздействие лазерного излучения (отжиг) на полупроводник приводит к различным изменениям кристаллической структуры, оптических и электрофизических свойств. Это явление называется импульсной ориентированной кристаллизацией. Лазерный отжиг в широком смысле – структурные изменения, возникающие на поверхности вещества под действием как импульсного, так и непрерывного лазерного излучения. При действии на полупроводник лазерного излучения с энергией кванта, большей ширины запрещённой зоны, происходит его поглощение в тонком приповерхностном слое толщиной ~10^{-4}-10^{-5} см. При импульсном воздействии в этом слое происходят быстрые фазовые превращения: «плавление – отвердевание» и фазовые переходы «аморфное твёрдое тело – кристалл» / «кристалл – аморфное те-

ло». Эти превращения ведут к восстановлению регулярной кристаллической структуры, аморфизации, образованию и изменению кристаллической структуры в нанесённых на поверхность слоях, перераспределению легирующих примесей, перераспределению материала на поверхности с образованием упорядоченных поверхностных структур. Лазерный отжиг обусловлен действием теплового механизма, согласно которому энергия лазерного излучения, поглощаемая непосредственно электронной подсистемой, практически мгновенно путём поэтапной электрон-электронной, электрон-фононной и фонон-фононной релаксации передаётся решётке и нагревает её от начальной температуры до значения температуры отжига [10]. Благодаря возникающим в процессе лазерной обработки большим градиентам температуры реализуются большие скорости движения фронтов расплава и рекристаллизации, поэтому цикл отжига происходит за время порядка 100 нс. Цикл расплав-рекристаллизация полностью удаляет протяжённые дефекты (дислокации и кластеры точечных дефектов), но оставляет после себя довольно высокую концентрацию точечных дефектов, появление которых связано с высокой скоростью рекристаллизации при импульсной лазерной обработке [11].

Согласно данным [12] после лазерной обработки плёнок SiC:H происходит реконфигурация связей и структуры. Структура плёнки переходит из аморфной фазы в смешанные фазы кремния и аморфного карбида кремния. Одновременно с изменением структуры плёнки происходит изменение механизма проводимости. Так при комнатной температуре темновая проводимость обработанных плёнок возрастает на несколько порядков относительно исходных и составляет около 10^{-7}-10^{-6} См/см. Таким образом, лазерное облучение (отжиг) позволяет получить широкозонные структуры с высокой проводимостью, а также избежать повреждений подложек, типичных для термического отжига. Кроме того, метод лазерного отжига плёнок α-Si позволяет регулировать размер кристаллитов кремния за счёт изменения плотности энергии лазера (средний размер получаемых кристаллитов – ~4-6 нм) [13]. В исследовании микроструктурирования плёнок $CuInGaSe_2$ с помощью ультракоротких инфракрасных лазерных импульсов выявлено, что в результате облучения возникают лазерно-индуцированные поверхностные решётки, ориентация которых меняется в зависимости от линейной поляризации падающего света [14]. Для циркулярно-поляризованного света с левой или правой круговой поляризацией получаются подобные четко определенные поверхностные решетки. Исследования рельефа поверхности с помощью атомно-силового микроскопа подтвердили, что шероховатость поверхности структурированных образцов примерно в 3 раза выше, чем у необработанных плёнок. По сравнению с необработанными плёнками, измеренное оптическое пропускание структурированных образцов снижается на 30% в спектральной области 1-2 мкм, что указывает на значительное изменение фотоэлектрических свойств, обработанных лазерным излучением поверхностей, и соответственно рост КПД ФЭП.

Заключение

Лазерные методы обработки фотоэлектрических преобразователей – перспективное направление повышения эффективности солнечных модулей. Одним из самых важных направлений является лазерная модификация слоёв солнечного элемента. Несмотря на значительное количество работ, посвящённых данному вопросу, эта область весьма перспективна для научных исследований. Малоизученными остаются особенности технологического процесса твердофазного испарения кремния через плёнку окисла под воздействием гомогенизированного лазерного излучения без плавления кремния, и образование игольчатого рельефа на поверхности образца. Дальнейшие исследования в указанном направлении позволят выявить особенности влияния технологических факторов на эффективность СМ.

Библиографический список

1. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной энергетики // Физика и техника полупроводников - 2004, - Т. 38. - № 8. - 943 с.

2. Кудрявцева А.Л. ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» [Электронный ресурс] URL: http://www.mirprom.ru/public/lazernaya-mikroobrabotka-tochnye-i-effektivnye-resheniya.html (Дата обращения: 01.02.2017).

3. Haas S., Gordijn A., Stiebig H. High speed laser processing for monolithical series connection of silicon thin-film modules // Progress in Photovoltaics: Research and Applications - 2008, V. 16. - No. 3. - Pp. 195-203.
4. Редька Д.Н. Лазерная микрообработка тонкоплёночных солнечных модулей: дис. канд. техн. наук. ЛЭТИ, С.-Пб., 2016 - 128 с.
5. Rublack T., Schade M., Muchow M. Proof of damage-free selective removal of thin dielectric coatings on silicon wafers by irradiation with femtosecond laser pulses // J. Appl. Phys. - 2012, V. 112. - No. 2. - P. 023521.
6. Kim T.-W., Pahk H.-J., Park H.K. Comparison of multilayer laser scribing of thin film solar cells with femto, pico, and nanosecond pulse durations // Proceedings of SPIE 7409 on Thin Film Solar Technology - 2009, Pp. 74090A-74090A10.
7. Редька Д.Н. Оптимизация структурирования тонкоплёночных солнечных модулей на основе кремния методом лазерного скрайбирования: дис., защищена 04.05.2012; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ).
8. Raciukaitis G., Stankevicius E., Gecys P. Laser processing by using diffractive optical laser beam shaping\technique // 11th International Symposium on Laser Precision Microfabrication - 2010, Pp. 1-6.
9. Baird B., Gerke T. P2 AND P3 spatially shaped laser scribing of CdTe and a-Si thun film solar cells using a 532 nm picosecond MOFPA // Wieland 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition - 2011, Pp. 2471-2474.
10. Zhang S., Wei S., Zunger A. Intrinsic n-type versus p-type doping asymmetry and the defect physics of ZnO // Physical Review B - 2001, V. 63. - No. 7. - P. 075205.
11. Peng Y. C., Fu G. S., Yu W. Crystallization of amorphous Si films by pulsed laser annealing and their structural characteristics // Semiconductor Science and Technology - 2004, V. 19. - Pp. 759-763.
12. Ambrosone G., Coscia U., Lettieri S. Crystallization of hydrogenated amorphous silicon-carbon films by means of laser treatments // Appl. Surf. Sci. - 2005, V. 247. - No. 1-4. - Pp. 471-476.
13. Peng Y. C., Fu G. S., Yu W. Crystallization of amorphous Si films by pulsed laser annealing and their structural characteristics // Semiconductor Science and Technology - 2004, V. 19. - No. 6. - Pp. 759-763.
14. Yang J., Wang R., Liu W. Investigation of microstructuring $CuInGaSe_2$ thin films with ultrashort laser pulses // J Phys. D Appl. Phys. - 2009, V. 42. - Pp. 215305-2153058.

УДК 538.97;539.23;539.216.1; ГРНТИ 29.19.22; 29.19.16

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В ПЛЕНКАХ A-C:H<SN_X>СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

А. Рягузов, Р. Немкаева, Н. Гусейнов, Д. Мамырбаева
«Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа»
КазНУ им. аль-Фараби, Республика Казахстан, Алматы, ryaguzov_a@mail.ru

Аннотация. В работе установлено влияние наночастиц олова на плотность электронных состояний в аморфной гидрогенизированной углеродной пленке. Показаназависимостьинтенсивности фотолюминесценции (ФЛ) от концентрации олова. Кроме этого установлено, что при концентрации олова ~ 3,0 ат.% ФЛ достигает максимума интенсивности, и при дальнейшем увеличении концентрации олова происходит ее уменьшение.
Ключевые слова: аморфный гидрогенизированный углерод, наночастица, рамановская спектроскопия, фотолюминесценция.

PHOTOLUMINESCENCE IN THE A-C:H<SN_X>FILMS SYNTHESIZED BY MAGNETRON SPUTTERING

A. Ryaguzov, R. Nemkayeva, N. Guseinov, D. Mamyrbayeva
"National Nanotechnological Laboratory Open Type"
Al-FarabiKazNU, Republic of Kazakhstan, Almaty, ryaguzov_a@mail.ru

Annotation. The paper reveals the influence of tin nanoparticles on the electron density of states in the hydrogenated amorphous carbon film. The dependence of the photoluminescence intensity (PL) on the tin concentration is shown.Also itis established that at the concentration of tin ~ 3,0 at.%, PL reaches its maximum and decreaseswith a further increase of tin concentration.
Keywords: hydrogenated amorphous carbon, Raman spectroscopy, photoluminescence, nanoparticles.

1. Введение

Электронные свойства полупроводников определяются распределением плотности-разрешенных электронных состояний на краях зон и в области уровня Ферми. В работах [1, 2] рассмотрен вопрос о распределении плотности состояний в a-C и a-C:H пленках. На рисунке 1 представлены модели распределения плотности состояний (DOS) σ и π электронов.

Из рисунка 1 (a, b, c, d) видно, как изменяется плотность состояний электронов в аморфном углероде в зависимости от процентного соотношения sp^2 гибридизированных связей. Распределение плотности состояний в алмазе представлено на рисунке 1(e) и в однослойном графите - на рисунке 1(f). Обращает на себя внимание, что π состояния, образованные sp^2 узлами, лежат внутри области σ состояний - сформированных sp^3 узлами. Поэтому образование sp^2 и sp^3узлов можно характеризовать не только, как определенные единицы атомной структуры неупорядоченной сетки аморфного углерода, но и как носители энергетического состояния электронов.

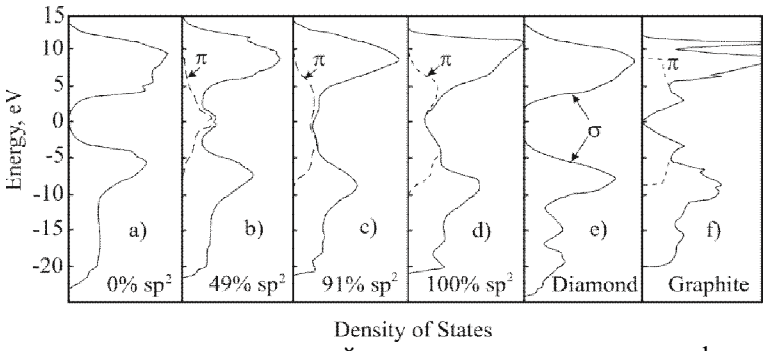


Рис. 1. Распределение плотности состояний электронов по энергиив аморфном углероде [2]

В работе [2] отмечается, что образование π состояния не зависит от формирования σ состояния. Это объясняют тем, что sp^2узлы должны быть пространственно скоррелированы в неупорядоченной матрице sp^3узлов, и могут произвести разрыв зоны даже при отсутствии sp^3 узлов. π - состояния наполовину заполнены и поэтому могут создать разрыв на уровне Ферми, что приведет к общему понижению энергии π электронов на атом и тем самым стабилизирует образование структуры. Образование запрещенной зоны будет зависеть от концентрации и расположения π состояний и, косвенно, от других факторов, таких, как содержание водорода [2]. Поэтому π электроны играют важную роль как в формировании структуры, так и в проявлении электронных свойств.

На рисунке 2 представлена плотность состояний π и σ электронов в пленках a-C:H. Откуда видно, что формирование плотности состояний зоны проводимости свободными π* и σ* электронами существенно отличается от формирования плотности связанных π и σ состояний в валентной зоне.

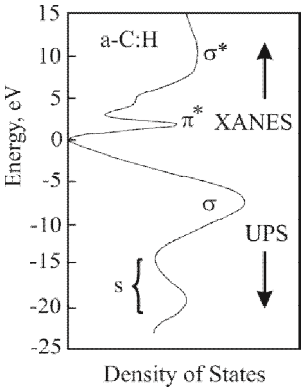


Рис.2. Распределение по энергии плотности состояний электронов в зоне проводимости,определенноеметодом спектроскопии поглощения 1s атомом углерода (XANES) [3] ив валентной зоне,методом ультра фотоэмиссионной спектроскопией [4],в пленках аморфного гидрогенизированного углерода

В зоне проводимости видно четкое разделение формируемых π* и σ* состояний, в то время как в валентной зоне осуществляется плавный переход σ состояний в π состояния.Это связано с частичной пассивацией π состояний водородом, что приводит к уменьшению sp^2 узлов и появлению разрыва в зоне на уровне Ферми. Сравнивая распределения плотности состояний аморфного углеродаи аморфного гидрогенизированного углерода, видим существенную разницу, что и определяет отличие в электронных свойствах. Так, оптическая ширина запрещенной зоны (E_g, Тауца) в a-C пленках составила 1,67 эВ [5] и по результатам проведенных исследований в данной работе в пленках a-C:HE_g~2,15 эВ. Данное сравнение E_g в a-C и a-C:H пленках показано по причине равных термодинамических и кинетических условийих синтеза.

Как отмечено в работе [6], различие ширины запрещенной зоны sp^2 и sp^3узлов приводит к сильной флуктуации формируемых зон и sp^3 узел выступает как энергетический барьер между sp^2 уз-

лами. Чем более разупорядоченная система, тем меньше вероятности образования sp^2 кластеров, sp^2 узлы возникают внутри сетки sp^3 матрицы. При этом в формировании краев зон все равно участвуют sp^2узлы. Такое поведение sp^2и sp^3 узлов при формировании структуры a-C:H пленки может приводить к существенному отличию в формировании плотности π и σ состояний. При сильных флуктуациях зон наблюдается малая подвижность носителей, но при этом высокая интенсивность люминесценции. Фотолюминесценция в a-C:H существенно не зависит от температуры, имеет малое время рекомбинации и не исчезает в электрическом поле [6]. Пока однозначной модели описания фотолюминесценции в аморфном углероде нет.

В работе [7] показано, как изменяется фотолюминесценция a-C:H пленок от давления газа в рабочей камере при их синтезе.Увеличение давления рабочего газа приводило к уменьшению E_ga-C:H пленок с 2,35 эВ до 2,0 эВ. Уменьшение E_g можно связать с увеличением концентрации sp^2 узлов и соответственно π электронов, что и определяло изменение ФЛ. При изменении давления от 0,5 до 0,9 Па интенсивность ФЛ (I_{PL}) увеличилась в 5 раз. Положение максимума I_{PL} не зависело от давления газа, и соответствовало энергии ≈2,1 эВ. Однако есть ряд работ [8-11], где показано, что положение максимума и форма ФЛ существенно зависят от метода и термодинамических условий синтеза.

2. Результаты и обсуждение

На данном этапе работы нами не преследовалось проведение широких исследований ФЛ и ее кинетики в зависимости от условий синтеза. Задача состояла в изучении влияния параметров синтеза углеродных пленок и концентрации вводимой примеси олова на проявление и интенсивность ФЛ. Пленки a-C:H<Sn_x> синтезировались магнетронным ионно-плазменным распылением комбинированной мишени в атмосфере смеси газов $92Ar/4CH_4/4H_2$ на кварцевых пластинах. Олово не образует химической связи с атомами углерода и выступает в углеродной матрице как самостоятельный элемент структуры. Наночастицы олова равномерно распределялись по объему a-C:H<Sn_x>пленки и в зависимости от вводимой концентрации изменялся их средний размер и количество на единице площади.

Синтез пленок осуществлялся при удельной мощности разряда 2,0 Вт/см^2, температуре подложки <50ºСи давлении смеси газов 0,7 Па. Структура пленок определялась методом комбинационного рассеяния света и характеризовалась полимероподобным атомным строением.

ФЛ a-C:H<Sn_x> пленок исследовали на установке NTegraSpectra(НТ-МДТ, Россия). На рисунке 3 представлены спектры ФЛ пленок a-C:H в зависимости от концентрации Sn.

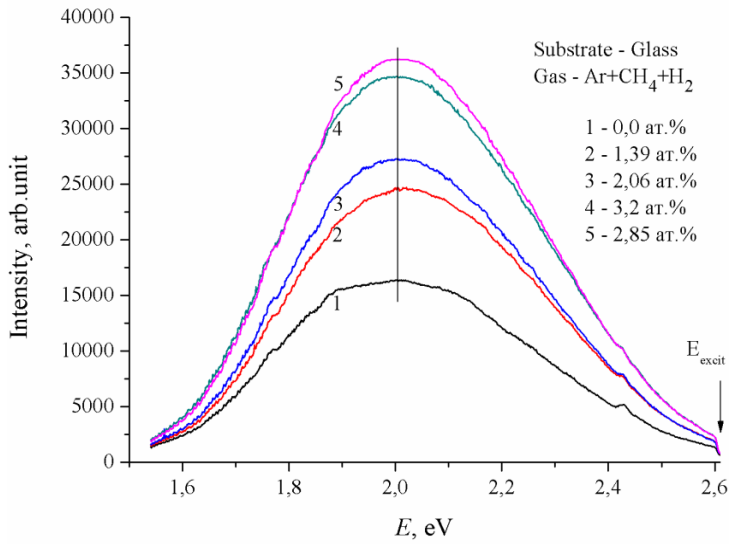


Рис.3. Фотолюминесценция в a-C:H<Sn_x> пленках синтезированных ионно-плазменным методом на постоянном токе

Из рис.3 видно, что независимо от концентрации олова, максимум I_{PL} расположен при одной энергии излучения и составляет ~2,0 эВ. Увеличение концентрации олова приводит к

увеличению интенсивности излучения ФЛ, но, в тоже время, стоит заметить, что при X_{Sn}~3.0 ат.% наблюдаем насыщение фотолюминесценции и при дальнейшем увеличении концентрации Sn интенсивность ФЛ начинает уменьшаться.

Введение малых концентраций олова приводит к увеличению E_g пленок, а начиная сX_{Sn}>1,3 ат.% наоборот, наблюдается уменьшение запрещенной зоны. При 1,0<X_{Sn}<1,3 ат.% E_g≈2,4 эВ. Увеличение концентрации олова до X_{Sn}~3,0 ат.% приводит к уменьшению E_g до значения E_g в чистой a-C:H пленке. При X_{Sn}~3,0 ат.% наблюдаем максимум энергии излучения ФЛ, дальнейшее увеличение X_{Sn} приводит к уменьшению I_{PL} люминесценции. Таким образом, можно утверждать, что наночастицы олова влияют на величину плотности π и π*состояний в хвостах зон.

Наночастица Sn при малых размерах, возможно, формируется в модификацию α-Sn структуры и способствует формированию sp^3C-C узлов. Уменьшение концентрацииπ электронов приводит к увеличению запрещенной зоны, что и наблюдаем при малых концентрациях олова. Увеличение размеров наночастиц олова может привести к переустройству в β-Sn модификацию, которая может способствовать образованию sp^2 C-C узлов.

Кроме этого, олово создает дополнительную локализацию разрешенных состояний у потолка валентной зоны - примесный центр, который может быть причиной увеличения числа излучательных переходов. Увеличение концентрации Sn более 3,0 ат.% приводит к возможному числу термализованных переходов, за счет уширения энергетической полосы состояний ниже уровня Ферми, что уменьшает величину I_{PL}.

Итак, на основании ограниченного числа возможных исследований, мы предложили предварительно свое видение на процесс фотолюминесценции в a-C:H<Sn_x> пленках.

Заключение

В работе рассмотрен процесс фотолюминесценции в a-C:H<Sn_x>пленках. Выявлено влияние концентрации олова на интенсивность ФЛ. По изменению значений ширины запрещенной зоны в зависимости от концентрации олова определено, что наночастицы Sn в зависимости от концентрации и размеров влияют на формирование sp^2 и sp^3 узлов матрицы, изменяя их соотношение, и тем самым дополнительно влияя на процесс излучательной рекомбинации.

Работа выполнена в рамках грантового финансирования 3219/ГФ комитета науки МОН РК.

Библиографический список

1. BeemanD., SilvermanJ., LyndsR., AndersonM.R. Modelingstudiesofamorphousa-C:H<Sn_x>пленкахcarbon//Phys.Rev. B. – 1984. – Vol.30. – №2. – P.870-875.
2. Robertson J., O'Reilly E.P. Electronic and atomic structure of amorphous carbon//Phys.Rev. B. – 1987. – Vol.35. – №6. – P.2946-2957.
3. Fink J., Muller-Heinzerling T., Pfluger J., Bubenzer A., Koidl P., Crecelius G. Structure and bonding of hydrocarbon plasma generated carbon films: an electron energy loss study//Solid St.Commun.. – 1983. – Vol.47. – №.9. – P.687-691.
4. Wesner D., Krummacher S., Carr R., Sham T.K., Strongin M., Eberhardt W., Weng S.L., Williams G., Howells M., Kampas F., Heald S., Smith F.W. Synchrotron-radiation studies of the transition of hydrogenated amorphous carbon to graphitic carbon//Phys.Rev. B.– 1983. – Vol.28. – №4. – P.2152-2156.
5. Ryaguzov A.P., Yermekov G.A., Nurmamytov T.E., Nemkayeva R.R., Guseinov N.R., Aliaskarov R.K. Visible Raman spectroscopy of carbon films synthesized by ion-plasma sputtering of graphite//J. Mater. Res. -2016. –V.31. –№ 1. –P.127-136.
6. Robertson J.Electronic processes in hydrogenated amorphous carbon//J. of Non-Cryst. Solids. – 1996. – Vol.198 - 200.– P.615-618.
7. Ryaguzov A.P., Nemkayeva R.R., Alpysbaeva B.E., Aliaskarov R.K. Amorphous hydro-genated carbon films. Synthesis, structure and properties//J.Phys.:Conf.Ser.. – 2016. – Vol.751. – P.012027(1-5).
8. DemichelisF., SchreiterS., TagliaferroA. Photoluminescence in a-C:H films//Phys.Rev. B. – 1995. – Vol.51. – №4. – P.2143-2147.
9. Li Z.F., Yang Z.Y., Xiao R.F.Visible photoluminescence from hydrogenated amorphous carbon films prepared by pulsed laser ablation of polymethyl methacrylate (PMMA)//Appl. Phys. A – 1996. – Vol.63.– P.243-246.

10. MarchonB., GuiJ., GrannenK., RauchG.C. Photoluminescence and Raman spectroscopy in hydrogenated carbon films//Transactions on magnetics. – 1997. – Vol.33.- №5. – P.3148-3150.
11. Xu J., Li W., Ma T., Li Z., Li W., Chen K. Novel photoluminescence from hydrogenated amorphous carbon films prepared by using xylene source//J. Mater. Res.– 2001. – Vol.16.-№2.– P.325-328.

УДК 538.97;539.23;539.216.1; ГРНТИ 29.19.22; 29.19.16

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ПОДЛОЖКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ A-C:H<SN_X> ПЛЕНОКПРИ РАЗНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ СИНТЕЗА

А.П. Рягузов*, Р.Р. Немкаева*, Б.Е.Алпысбаева, Н.Р. Гусейнов*, Д.М. Мамырбаева***
**- «Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа»*
*** - Нанотехнологическая лаборатория инженерного профиля*
КазНУ им. аль-Фараби, Республика Казахстан, Алматы, ryaguzov_a@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен вопрос влияния подложки на формирование структуры аморфных гидрогенизированных углеродных пленок модифицированных наночастицами олова. Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) наглядно показано отличие морфологии структуры поверхности a-C:H<Sn_x> пленок синтезированных на кремниевой (100) и кварцевой поверхностях.Методом рамановской спектроскопии выявлено существенное отличие в локальной атомной структуре данных пленок. Показано существенное влияние энергетических параметров синтеза на локальную структуру a-C:H<Sn_x> пленок в зависимости от атомной структуры подложки.

Ключевые слова: аморфный гидрогенизированный углерод, наночастица, рамановская спектроскопия, атомно-силовая микроскопия.

THE EFFECT OF THE SUBSTRATE MATERIAL ON THE STRUCTURE OF A-C:H <SN_X> FILMS AT DIFFERENT ENERGETIC SYNTHESIS CONDITIONS

A.P. Ryaguzov*, R.R. Nemkayeva*, B.E.Alpysbayeva, N.R. Guseinov*, D.M. Mamyrbayeva***
**-"National Nanotechnological Laboratory Open Type"*
***-Nanotechnological laboratory of engineering profile*
Al-FarabiKazNU, Republic of Kazakhstan, Almaty, ryaguzov_a@mail.ru

Annotation. The question of the influence of the substrate on the formation of the structure of amorphous hydrogenated carbon films modifiedby tin nanoparticles is considered. Using atomic force microscopy (AFM) it is clearly shown the difference between the surface structure morphology of a-C:H<Sn_x> films synthesized on a silicon (100) and quartz surfaces. Studies of the local atomic structure by Raman spectroscopy revealed a significant difference in the atomic structure of obtained films. A significant effect of energy synthesis parameters on the local structure of a-C: H <Sn_x> films depending on the atomic structure of the substrate is shown.

Keywords: hydrogenated amorphous carbon, nanoparticles, Raman spectroscopy, Atomic Force Microscopy.

1. Введение

В создании определенных структур в тонкопленочной наноэлектронике немаловажно знание взаимодействия поверхности подложки с растущей пленкой. Состояние поверхности подложки, аморфная или кристаллическая, может существенно влиять на формирование атомной структуры пленки. В работе [1] было показано, что основным видом взаимодействия между адатомом и атомной структурой поверхности подложки является электростатическое взаимодействие. Благодаря отличию в дипольном взаимодействии и изменению сил Ван-дер-Ваальса в зависимости от структуры поверхности и составляющих ее компонентов, формирование атомной структуры пленки может идти по-разному. Кроме этого, особую роль в формировании структуры играет энергия конденсируемых атомов. При определенных условиях может происходить имплантация и предимплантация в структуру подложки, что и приводит к определенному перемешиванию атомов и изменению природы структурно-фазового состояния конденсируемого вещества [2]. На формирование кристаллических нано слоев существенно влияет энергетическое состояние межфазной границы системы – интерфейса [3]. Это связано с отличиями в напряжениях атомной структуры подложки и атомной структуры растущей пленки. Упругие модули интерфейса и подложки, как правило, отличаются.

В работе [4] рассмотрен вопрос осаждения пленок на различные проводящие, полупроводящие и диэлектрические поверхности. Было показано, что степень влияния материала подложки на фазообразование синтезируемых пленок зависит от метода синтеза, т.е. энергетического состояния конденсируемых атомов и молекул. Также рассмотрен вопрос влияния подложки в процессе магнетронного распыления, при котором энергия конденсируемых атомов существенно различается. Это приводит к различию энергии связи адатомов с подложкой и образования определенных структур, что обусловлено различной кинетикой, механизмом роста и их дисперсностью.

Авторы [5] провели исследование по выявлению условий синтеза композитного материала из ультрананокристаллического алмаза в аморфном углероде на подложку WC-Co методом коаксиального дугового плазменного осаждения. Они показали, что только при комнатной температуре возможно на подложке WC-Co зарождение наноалмазов, увеличение температуры приводит к определенной активации атомов Co, усилению их каталитических свойств, которые способствуют зарождению графитоподобных кластеров.

I. Ahmad и др. [6] исследовали влияние отрицательного напряжение смещения на подложках (из Si, Al и Cr) в процессе роста пленок аморфного углерода (a-C) методом ионно-плазменного магнетронного распыления. Они исследовали конфигурацию химических связей a-C пленок спектроскопией малоуглового рентгеновского поглощения тонкой структуры (NEXAFS). Показали, что в зависимости от напряжения смещения на подложке изменяется механизм роста и при напряжениях более 100 В формирование структуры происходит в основном из sp^2 узлов. Уменьшение напряжения смещения приводит к росту sp^3 гибридизированных связей. При этом на подложках из Al и Cr отрицательное напряжение смещения не существенно влияет на изменение структуры a-C пленок. Ранее нами тоже были проведены исследования влияния атомной структуры подложки на формирование a-C пленок [7].

В представленной работе исследовано влияние атомной структуры подложки на формирование структуры a-C:H<Sn_x> пленок в зависимости от ее температуры (T_{sub}) и удельной мощности (P_d) ионно-плазменного разряда магнетронного распыления на постоянном токе. Изменение структуры a-C:H<Sn_x> пленок изучено методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и комбинационного рассеяния света (КРС).

2. Технология синтеза и исследование структуры

Синтез пленок осуществлялся ионно-плазменным магнетронным со-распылением комбинированной мишени (из графита и частичек олова) на постоянном токе (DC) в атмосфере смеси газов $92Ar/4CH_4/4H_2$. Чистота каждого компонента смеси газов и графитовой мишени составляла 99,999 ат.%, олова 99,98 ат.%. Температура подложки поддерживалась с точностью ±1,5ºС. Для получения стабильной удельной мощности плазменного разряда, т.е. ток разряда и падение напряжения, регулировали индукцию магнитного поля магнетрона. Давление смеси газов, и средняя скорость роста пленок составляло 0,7 Па и 0,2 Å/с, соответственно. Образцы приготавливались на кварцевой и кремниевой пластинах одновременно в одинаковых условиях.

Синтезируемые аморфные углеродные пленки при T_{sub}≤50ºС имели удельное сопротивление ~10^{10} Ом·см, что приводило накоплению статического заряда, который вносил существенные изменения в проведении сканирования методом полуконтактной микроскопии. Поэтому результаты атомно-силовой микроскопии получены с использованием метода модуляции силы на установке NTegra Therma (НТ-МДТ, Россия). Зонды имели радиус закругления, согласно паспорту, 10 нм.

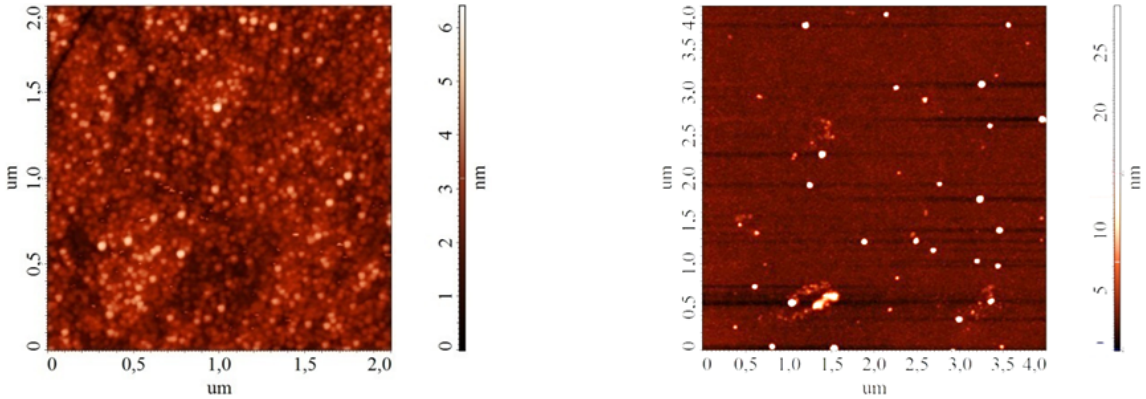
Методом КРС исследовали изменение гибридизации связей в структуре в зависимости от условий синтеза на установке NTegra Spectra (НТ-МДТ, Россия). Рамановские спектры получали с использованием лазера на длине волны 473 нм и мощностью излучения 1,5 мВт. Во избежание воздействия лазерного излучения на атомную структуру a-C:H<Sn_x> пленок измерения КРС проводились в движении со скоростью 10 мкм/с.

Концентрация олова во всех синтезируемых аморфных пленках изменялась в пределах ±0,2 ат.% около <X_{Sn}> среднего значения 1,5 ат.% и определялась методом энергодис-

персионного рентгеновского микроанализа (EDS). Точность определения концентрации методом EDS составляла ±0,01 ат.%.

3. Результаты исследований и их обсуждение

Проведенные исследования морфологии поверхности a-C:H<Sn_x> пленок атомно-силовой микроскопией показаны на рисунке 1. Приведены результаты АСМ поверхности с большим содержанием олова в углеродных пленках, чтобы показать, что форма нанокластеров олова сферическая с максимальными размерами при данной концентрации до 60 нм. Сравнение двух рисунков а) и б) наглядно показывает, что структуры пленок при одинаковых условиях синтеза отличаются. На рисунке 1(а) пленка на аморфной поверхности кварцевой пластины формируется в виде глобул. Сразу отметим, что влияние олова на морфологию аморфной гидрогенизированной углеродной пленки отсутствует. Ранее в работе [8] нами были представлены АСМ изображения a-C:H пленок, синтезированных при разных условиях, где показано, что на диэлектрической поверхности с аморфной структурой формирование пленки происходит кластерами.



а) Подложка - кварц б) Подложка – Si(100)

Рис. 1. Полуконтактная АСМ поверхности a-C:H пленок модифицированных нанокластерами Sn с концентрацией 2,82 ат.% синтезированных при удельной мощности плазменного разряда 2,5 Вт/см^2 на постоянном токе и температуре подложки 50°С

Это связано с существенным различием электростатического взаимодействия неупорядоченной атомной структуры поверхности стекла с атомами углерода, что приводит к формированию углеродных кластеров в виде сферы – глобулы. Так как размеры глобул менее 100 нм, то такие структуры относятся к высокодисперсным системам.

В то же время наблюдаем совершенно другую микроскопическую картину поверхности a-C:H<Sn_x> пленок, синтезированных на кристаллической кремниевой пластине (рис. 1б). Светлые точки – наночастицы олова. В целом, гидрогенизированная углеродная матрица однородна по морфологии структуры. Отсутствие глобул связано с отсутствием избирательного направления роста структуры пленки. Равномерное распределение электростатического потенциала атомной структуры по кристаллической поверхности кремниевой пластины приводит к наиболее равномерному распределению формирования структуры матрицы углеродных пленок.

Наночастицы олова существенного влияния на морфологию структуры углеродной пленки не оказывают по причине отсутствия образования химической связи с атомами углерода. Единственное на что могут влиять наночастицы олова, так это на формирование структуры ближнего и среднего порядка углеродной матрицы. Такое влияние может передаваться через дипольное взаимодействие структуры наночастицы олова на структуру углеродной матрицы.

Для более детального выявления влияния подложки на формирование атомной структуры a-C:H<Sn_x> пленок были проведены исследования комбинационного рассеяния света. На рисунке 2 представлены спектры КРС в a-C:H<Sn_x> пленках синтезированных при трех

различных температурах. Как известно [9, 10], Рамановские спектры углеродных структур характеризуются двумя основными линиями излучения, которые относятся к интервалам частот 1500 – 1600 см$^{-1}$ и 1340-1450 см$^{-1}$, и обозначаются G и D пики соответственно. Появление G пика вызвано колебаниями растяжения и сжатия C-C sp^2 гибридизированных узлов, поэтому его появление характерно для широко спектра различных модификаций структуры углерода. Появление D пика связывают с колебательной модой колец из атомов углерода, но при условии существования у такой структуры хотя бы минимум двух степеней свободы.

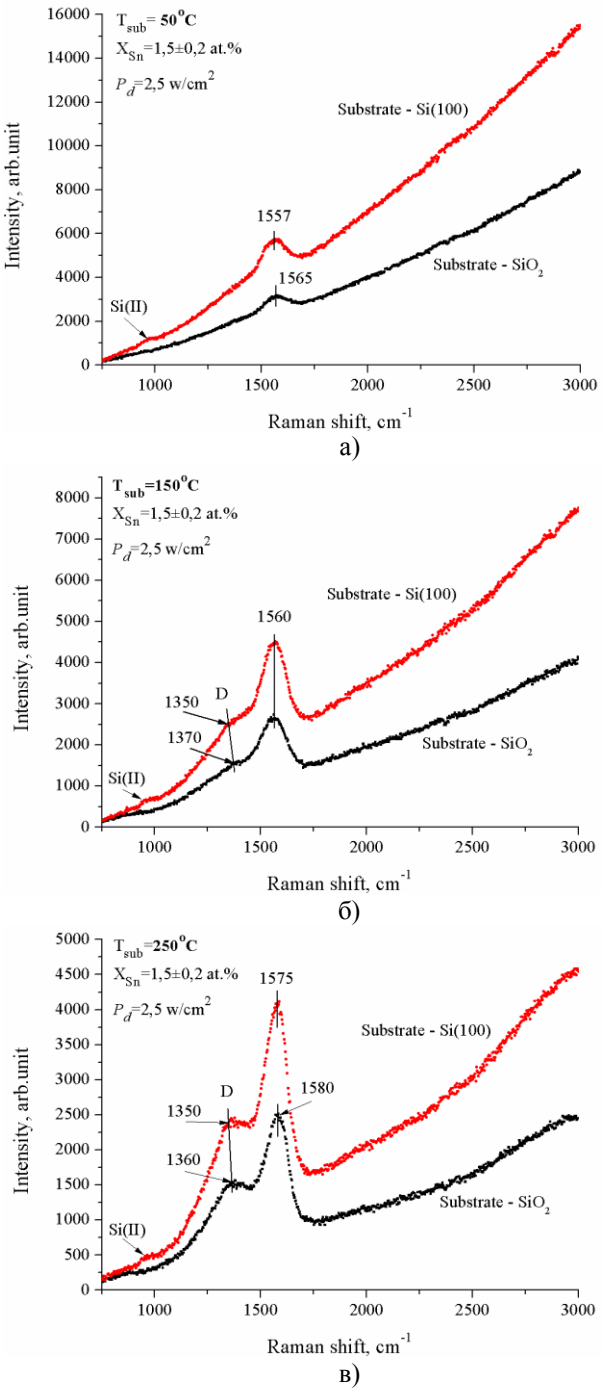


Рис. 2 Спектры КРС в a-C:H<Sn$_x$> пленках синтезированных при трех температурах подложки: а) 50ºС, б) 150ºС и в) 250ºС

Только в этом случае возможно возникновение дыхательной моды. В высоко ориентированном пиролитическом графите, нанотрубке или в графене пик D отсутствует. Таким образом, можно сказать, что пик D проявляется только в атомной структуре содержащей дефекты.

В пиролитическом графите G пик принимает значение 1580 см$^{-1}$. В дефектном графите пик D появляется на частоте 1350 см$^{-1}$. Пик алмаза находится на линии 1330 см$^{-1}$. В работе [10] отмечено, что смещение G в низкочастотную область говорит об увеличении sp^3 гибридизированных связей.

Из рисунка 2 видно, что увеличение температуры подложки приводит к увеличению D пика и смещению G пика в высокочастотную область. Кроме этого, наблюдаем увеличение наклона кривой КРС в высокочастотной области. Появление наклона связано с фотолюминесценцией (ФЛ). Кроме этого из рисунка 2 видно, что кривая КРС от пленки на кремниевой подложке выше кривой КРС от пленки, синтезированной на кварцевой подложке, независимо от их температуры. При этом, отличие в интенсивности ФЛ в два раза. С увеличением температуры синтеза ФЛ уменьшается на одинаковую величину. Появление пика D на рисунке 2 (б, в) говорит об графитизации структуры пленки и это подтверждает смещение G пика в высокочастотную область. Т.е. можно заключить, что в основе формирования структуры пленки лежит температура синтеза, но отличие в спектрах ФЛ по интенсивности говорит, что атомная структура поверхности подложки влияет на формирование тонкой структуры – ближнего и среднего порядка. И в этом определенную роль играет дисперсность – глобулярность структуры пленки.

Возможно, определенный вклад в формирование тонкой структуры оказывают наночастицы олова. Не учитывать их влияние было бы ошибочно. Олово может формиро-ваться в α-Sn и β-Sn модификации структуры в зависимости от условий синтеза и также вносить свой вклад в формирование атомной структуры a-C:H<Sn$_x$> пленок и, как следствие, влиять на фотолюминесценцию.

Другой немаловажной энергетической характеристикой, влияющей на процесс синтеза пленок, является удельная мощность ионно-плазменного разряда. Удельная мощность относится к кинетическим характеристикам и от ее величины существенно зависит энергия конденсируемых атомов. Атомно-силовая микроскопия поверхности синтезированных a-C:H<Sn_x> пленок от P_d показала, что морфология пленок выращенных на стеклянных подложках также характеризуется глобулярной структурой. С ростом P_d разряда размер глобул увеличивается, и увеличивается их агломерация. Это в свою очередь влияет на формирование ближнего и среднего порядка атомной структуры.

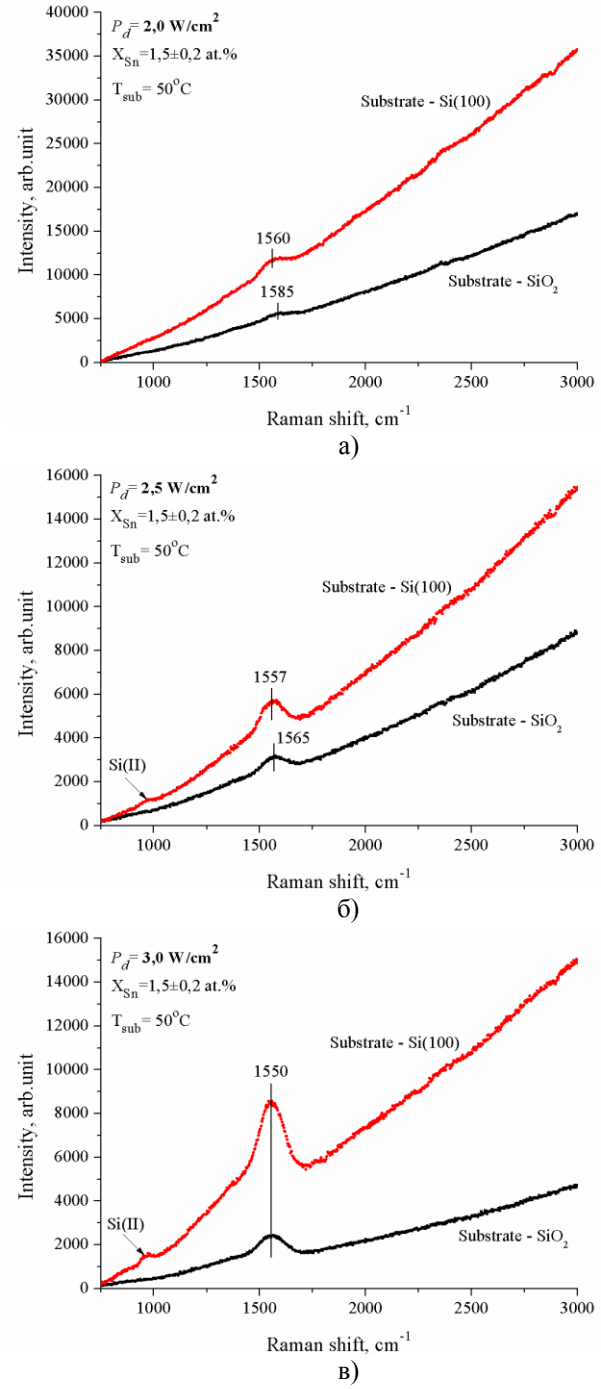


Рис. 3. Спектры КРС в a-C:H<Sn_x> пленках синтезированных при трех удельных мощностях DC разряда: а) 2,0Вт/см^2, б) 2,5 Вт/см^2 и в) 3,0 Вт/см^2

На рисунке 3 показано насколько существенно влияет удельная мощность DC разряда на локальную структуру a-C:H<Sn_x> пленок. Как при изменении температуры синтеза, так и изменении P_d разряда наблюдаем подобную картину в расположении спектров КРС от пленок, синтезированных на разных подложках. Обращает на себя внимание интересный факт, с увеличением удельной мощности DC разряда G пик смещается в низкочастотную область. При P_d=3,0 Вт/см^2 положения G пиков в спектрах КРС от пленок синтезированных на разных подложках выравниваются и принимают значение 1550 см$^{-1}$. Такое положение G пика приписывают алмазоподобной структуре [10]. Наклон ФЛ в пленках с увеличением P_d на кварцевых подложках уменьшается кратно 2. В тоже время на кремниевой пластине ФЛ при P_d= 2,5 Вт/см^2 и P_d=3,0 Вт/см^2 практически не изменилась. Это может быть связано с возрастанием скорости разложения молекул метана в плазме разряда и усилением дополнительного механизма структурообразования в процессе синтеза пленки. Существенное отличие в морфологии структуры пленок на разных подложках по-разному влияют на ФЛ.

С другой стороны, при P_d=3,0 Вт/см^2 может происходить формирование только определенной модификации структуры олова на разных подложках и этим влиять на ФЛ.

Заключение

В данной работе наглядно показано влияние материала и атомной структуры подложки на формирование структуры аморфной гидрогенизированной углеродной пленки модифицированной наночастицами олова. Диэлектрическая подложка с неупорядоченной атомной структурой формирует высокодисперсные глобулярные углеродные пленки, в то же время полупроводящие подложки с кристаллической структурой формируют однородные по морфологии структуры a-C:H<Sn_x> пленок. Кроме этого, показано существенное отличие фотолюминесценции пленок, синтези-

рованных на Si(100) и SiO_2 подложках. Откуда можно сделать вывод о влиянии материала подложки на формирование тонкой структуры синтезируемых пленок.

Работа выполнена в рамках грантового финансирования 3219/ГФ комитета науки МОН РК.

Библиографический список

1. Р.А. Андриевский Синтез и свойства пленок фаз внедрения//Успехи химии. –1997. –Т.66. –№1. – С.57-77.
2. А.Д. Коротаев, С.В.Овчинников, А.Н.Тюменцев, Ю.П.Пинжин, Г.Ю.Юшков, А.Г. Николаев, К.П. Савкин О влиянии условий ионной имплантации на природу структурно-фазового состояния ионно-легированного слоя в металлах и сплавах//Поверхность. -2004. -№ 1. -С.46-55.
3. В.М. Юрченко, Э.П. Фельдман, Л.Н. Гумен, А.А. Крохин, А.Е. Зюбанов Формирование сетки дислокаций несоответствия вблизи интерфейса пленка - подложка с учетом упругого контраста// Конденсированные среды и межфазные границы. –2008. –Т.10. –№3. – С.277-281.
4. П.И. Игнатенко, Д.Н. Терпий, Н.А. Кляхина О влиянии подложки на формирование состава, структуры и твердости нитридных и боридных пленок, полученных методами ионного осаждения// Журнал технической физики. –2009. –Т.79. –Вып.7. –С.101-107.
5. H. Naragino, M. Egiza, A. Tominaga, K. Murasawa, H.Gonda, M.Sakurai, T. Yoshitake Fabrication of ultrananocrystalline diamond/nonhydrogenated amorphous carbon composite films for hard coating by coaxial arc plasma deposition// EVERGREEN Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy. -2016. –V.3. -Is.1 -P.1-5
6. I. Ahmad, S.S. Roy, P.D. Maguire, P.Papakonstantinou, J.A.McLaughlin Effect of substrate bias voltage and substrate on the structural properties of amorphous carbon films deposited by unbalanced magnetron sputtering//Thin Solid Films. –2005. –V.482. –P.45– 49.
7. A.P. Ryaguzov, G.A. Yermekov, T.E. Nurmamytov, R.R. Nemkayeva, N.R. Guseinov, R.K. Aliaskarov Visible Raman spectroscopy of carbon films synthesized by ion-plasma sputtering of graphite // J. Mater. Res. -2016. -V.31. -№ 1. –P.127-136.
8. A.P. Ryaguzov, B.E. Alpysbayeva, R.R. Nemkayeva, R.K. Aliaskarov, D.M. Mamyrbayeva, O.I. Yukhnovets Structure and properties dependence of hydrogenated carbon films on conditions of synthesis at $Ar+CH_4+H_2$ plasma // Eur.Phys.Tech.J. -2016. -V.13. -№1. –P.52-59.
9. A.C. Ferrari, J. Robertson Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon // Physical Review B. -2000 -V.61, Issues 20. -P.14095-14107.
10. A.C. Ferrari, J. Robertson Origin of the 1150-cm^{-1} Raman mode in nanocrystalline diamond // Physical Review B. -2001 -V.63, -P. 121405-1-4.

УДК 538.97;539.23;539.216.1; ГРНТИ 29.19.22; 29.19.16

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОЛОВА НА СТРУКТУРУ АМОРФНЫХ ГИДРОГЕНИЗИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК

А.П. Рягузов, Р.Р. Немкаева, Н.Р. Гусейнов, Д.М. Мамырбаева
«Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа»
КазНУ им. Аль-Фараби, Республика Казахстан, Алматы, ryaguzov_a@mail.ru

Аннотация. В статье обсуждается структура пленок a-C:H<Sn_x>, синтезированных методом магнетронного со-распыления комбинированной мишени на постоянном токе (DC). Представлена возможность синтеза изолированных наночастиц олова в алмазоподобной гидрогенизированной углеродной матрице. Методом комбинационного рассеяния света (КРС) показано влияние частиц олова и условий синтеза на структуру a-C:H<Sn_x> пленок.

Ключевые слова: магнетронное распыление, алмазоподобный углерод, наночастица, рамановская спектроскопия.

EFFECTS OF TIN NANOPARTICLES ON STRUCTURE OF AMORPHOUS HYDROGENATED CARBON FILMS

A.P. Ryaguzov, R.R. Nemkayeva, N.R. Guseinov, D.M. Mamyrbayeva
"National Nanotechnological Laboratory Open Type"
Al-FarabiKazNU, Republic of Kazakhstan, Almaty, ryaguzov_a@mail.ru

Annotation. The article discusses the structure of a-C:H<Sn_x>films synthesized by magnetron co-sputtering of combined target at direct current (DC). The possibility of synthesis of isolated tin nanoparticles in a matrix of hydrogenated diamond-like carbon is presented. The influence of tin particles and the synthesis conditions on the structure of the a-C:H<Sn_x> films is shown using method of Raman scattering (RS).

Keywords: magnetron sputtering, diamond-like carbon, nanoparticle, Raman spectroscopy.

1. Введение

Разнообразие углеродных структур определяется пространственным расположением гибридизированных связей sp^1, sp^2 и sp^3C-C узлов. Формирование различных аллотропных структур углерода зависит от условий синтеза. Широкое распространение в области синтеза пленок получил метод магнетронного ионно-плазменного распыления (МИПР) на постоянном и переменном токе. Методом МИПР возможно в широком интервале различных термодинамических, кинетических и геометрических параметров синтеза получать структурно-модифицированные аморфные углеродные пленки. Небольшое отличие в процентном соотношении sp^2/sp^3 гибридизированных связей, как было отмечено нами ранее [1, 2], приводит к существенному отличию структуры и как следствие свойств синтезируемых пленок.Кроме этого, возможно получение гетероморфных пленок со структурой, состоящей из областей разной модификации. Если концентрация sp^3C-C связей превышает 30%, то такие пленки относят к аморфным алмазоподобным углеродным (DLC) пленкам (обозначают как ta-C и ta-C:Нтетрагональные структуры) [3]. Гетероморфные ta-C и ta-C:H пленки характеризуются определенными, присущими только им, свойствами. Ранее интерес к DLC пленкам был вызван их лучшими трибологическими характеристиками [4-6]. Тем не менее, важно рассмотреть вопрос об их полупроводниковых и диэлектрических свойствах в зависимости от структурной и примесной модификации. Существование в углеродной матрице изолированных наночастиц не карбидообразующих элементов разной химической природы, как известно, значительно влияет на распределение электронной плотности атомной структуры и, соответственно, на свойства ta-C:H пленок [7]. Наноструктурированные углеродные пленки могут составить существенную конкуренцию кремнию в создании новых устройств и структур в полупроводниковой электронике.

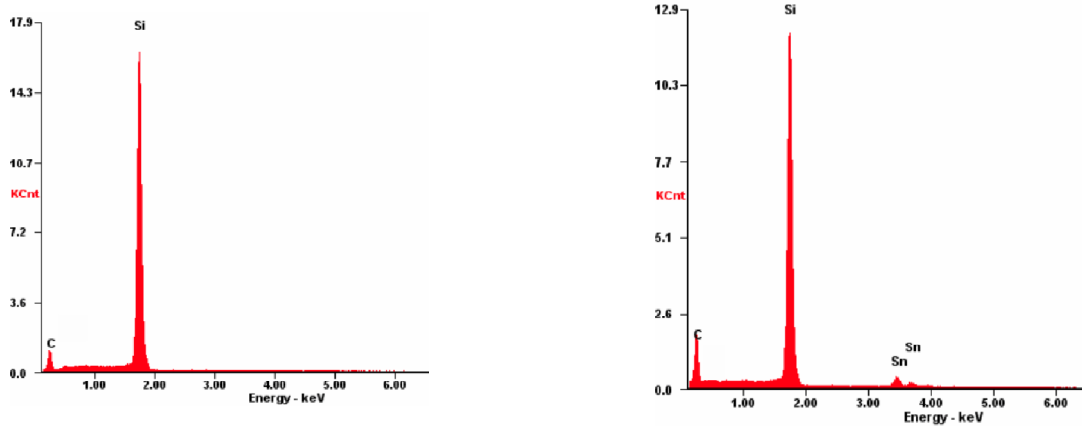
2. Технология синтеза и исследование структуры

Синтез гидрогенизированных углеродных пленок, модифицированных наночастицами олова, проводился методом магнетронного ионно-плазменного распыления комбинированной мишени в атмосфере смеси газов $92Ar:4CH_4:4H_2$ на постоянном токе. a-C:H<Sn_x> пленки были выращены на кремниевых (100) пластинках. Предварительно поверхности пластинок-проходили химическую очистку по удалению грязи и SiO_2. Для синтеза a-C:H<Sn_x>пленок использовался магнетрон с несбалансированной плазмой и регулируемой по величине индукцией ($\vec{B}$) магнитного поля. Одним из важных параметров синтеза является отношение E/p, где E – напряженность электрического поля между анодом и катодом и p – давление газа. В процессе синтеза происходит изменение тока плазмы и напряжения. Поэтому подаваемое напряжение от источника постоянного тока и электрон-ионный ток в плазме разряда дополнительно корректировались изменением $\vec{B}$ в процессе синтеза пленок. Удельная мощность (P_d) ионно-плазменного разряда равнялась 2,0 Вт/см^2, 2,5 Вт/см^2 и 3,0 Вт/см^2. Выбор значений удельной мощности связан со скоростью распыления металлов и графитовой мишени. Скорость распыления графита ~0,7 Å/с и это гораздо меньше скорости распыления металлов. Скорость распыления олова равна 25 Å/с при плотности тока 1 мА/см^2 и энергии ионов аргона 500 эВ. Кроме этого, выбор значений P_d связан с выявлением условий для получения алмазоподобных углеродных пленок.

Чистота газов аргона, метана, водорода и графитовой мишени соответствовала 99,999 ат.%, чистота олова - 99,98 ат.%. Рост a-C:H<Sn_x> пленок осуществлялся при давлении смеси газов 0,7 Па и температурах подложки (T_{sub}) 50, 150 и 250°C. Время распыления комбинированной мишени из графита и олова составляло 45 мин. Толщина пленок примерно равнялась 50±10 нм в зависимости от условий синтеза и определялась на растровом электронном микроскопе Quanta 200i 3D (FEI, USA), на свежем сколе кремниевой пластины.

Исследование структуры аморфных углеродных пленок методом КРС было проведено на установке NTEGRA Spectra (NT-MDT, Russia) с использованием синего лазера с длиной волны излучения 473 nm (2,62 eV). Во избежание воздействия лазерного излучения мощностью 1,5 мВт на атомную структуру пленок экспонирование осуществлялось в движении со скоростью 10 мкм/с.

Концентрация олова в a-C:H пленках определялась методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа EDS и менялась от 0,0 до 2,2ат.%. На рисунке 1, как пример, представлены спектры EDS углеродных пленок чистых и с примесью олова, синтезированных на кремниевых подложках.

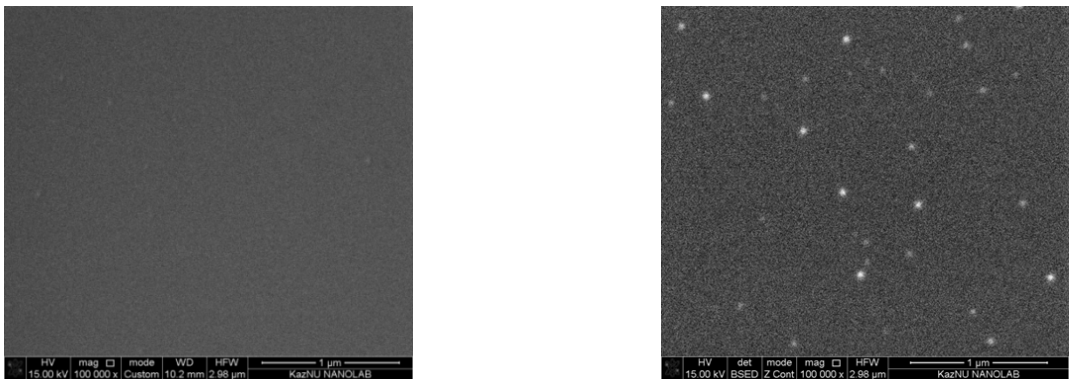


а) X_{Sn}=0,0 ат.% б)X_{Sn}=2,85ат.%

Рис. 1. Спектры EDS пленок a-C:H<Sn_x> , синтезированных ионно-плазменным распылением на постоянном токе

На растровом электронном микроскопе (РЭМ) выявлено, что олово формируется в наночастицы сферической формы. На рисунке 2 в качестве примера приведены снимки чистой пленки и с примесью олова, синтезированных при 2,5 Вт/см^2 и T_{sub}=50°C на постоянном токе.

Синтез осуществлялся в смеси газов, одним из компонентов которого является метан, поэтому в формировании структуры пленок одновременно участвуют два процесса - физическое вакуумное осаждение (PVD) и плазменно-усиленное парофазное осаждение (PECVD). PVD-процесс связан с распылением углеродной мишени ионами аргона, процесс PECVD связан с разложением молекул метана в плазме разряда, в связи с этим необходим более точный контроль параметров синтеза a-C:H<Sn_x> пленок.



а) X_{Sn}=0,0 ат.% б) X_{Sn}=0,35 ат.%

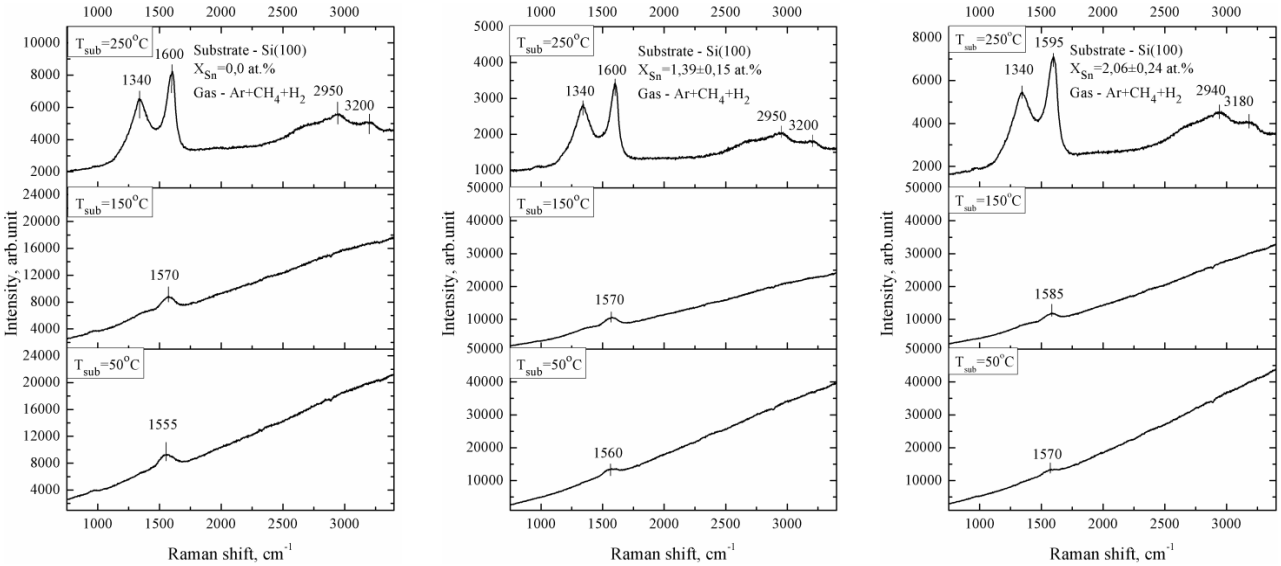
Рис. 2. Электронная микроскопия поверхности пленок a-C:H<Sn_x>

3. Результаты исследований и их обсуждение

Известно [3, 8-11], что спектры КРС a-C:H характеризуются основным G пиком в области 1540 – 1600 см$^{-1}$ и плечом или D пиком в низкочастотной области 1340 – 1400 см$^{-1}$. Положение и интенсивность GиD пиков определяются соотношением sp^2/sp^3 и конфигурацией связей sp^2 узлов. При этом a-C:H пленки характеризуются полимероподобной, графитоподобной или алмазоподобной атомной структурой.

Результаты КРС в пленках a-C:H<Sn_x>, полученных на Si(100) при удельной мощности разряда P_d=2,0 Вт/см^2, приведены на рисунке 3. Из рисунка 3 видно, что при температурах синтеза 50ºC и 150ºC спектры КРС характеризуются достаточно большим наклоном в

высокочастотной области, который характеризует проявление фотолюминесценции (ФЛ). С увеличением концентрации олова увеличивается интенсивность ФЛ, а также наблюдается смещение G пика в высокочастотную область, что указывает на увеличение концентрации sp^2 узлов или цепочечных структур =C=C=или –C≡C–. Увеличение концентрации олова до 2 ат.% при синтезе T_{sub}=50°C приводит к смещению G пика на 15 см$^{-1}$.



а) б) в)

Рис. 3. Спектры КРС a-C:H<Sn_x> пленок, синтезированных при разных T_{sub} и P_d=2,0 Вт/см^2

При температуре синтеза T_{sub}=250ºC пики D и Gсущественно увеличиваются по интенсивности.Увеличение интенсивности D пика связано с увеличением колец, формируемых из атомов углерода. Проявление D пика и положение G при 1600 см$^{-1}$ характеризует переход в графитоподобную фазу. Проявляются пики второго порядка, которые характеризуют колебания C-H (2950 см$^{-1}$) и C-C (3200 см$^{-1}$) связей. При T_{sub}=250°C и X_{Sn}~2 ат.% наблюдаем обратное незначительное смещение G в низкочастотную область. Олово может находиться в α-Sn и β-Sn модификациях. Возможно, при удельной мощности разряда 2,0 Вт/см^2 олово формируется в наночастицы β-Sn модификации структуры и при 50°C синтеза существенно оказывают влияние на формирование углеродной матрицы.Увеличение температуры синтеза уменьшает влияние наночастиц олова на формирование структуры a-C:H.

Кроме этого, проведены исследования по выявлению влияния удельной мощности на формирование структуры a-C:H<Sn_x>пленок. На рисунке 4 показано изменение спектров КРС в зависимости от P_d плазменного разряда и концентрации олова. В полимероподобной структуре наночастицы Sn активизируют образование sp^2 структурных единиц, об этом свидетельствует положение G пика 1570 и 1560 см$^{-1}$ для 2,0 и 2,5 Вт/см^2 соответственно.В тоже время увеличение P_d плазменного разряда приводит к смещению G в низкочастотную область и при P_d=3,0 Вт/см^2 и концентрации олова >2 ат.% пленки a-C:H<Sn_x> формируются в алмазоподобную структуру с высоким содержанием sp^3 гибридизированных связей ~80%, на что указывает положение G пика при 1545 см$^{-1}$[11].

Наибольшая фотолюминесценция наблюдается в пленках с концентрацией олова ~1,5 ат.%, при этом ее интенсивность увеличивается в 2 раза по сравнению с пленкой без примеси олова. a-C:H<Sn_x>пленки синтезированы на кремниевой кристаллической поверхности с ориентацией (100). Не учитывать влияние кристаллической поверхности на формирование аморфной углеродной структуры нельзя. На рисунке 4 (в) видно, что увеличение удельной мощности плазменного разряда на 0,5 Вт/см^2 приводит к уменьшению ФЛ в 5 раз, дальнейшее увеличение еще на 0,5 Вт/см^{2}к небольшому увеличению ФЛ.

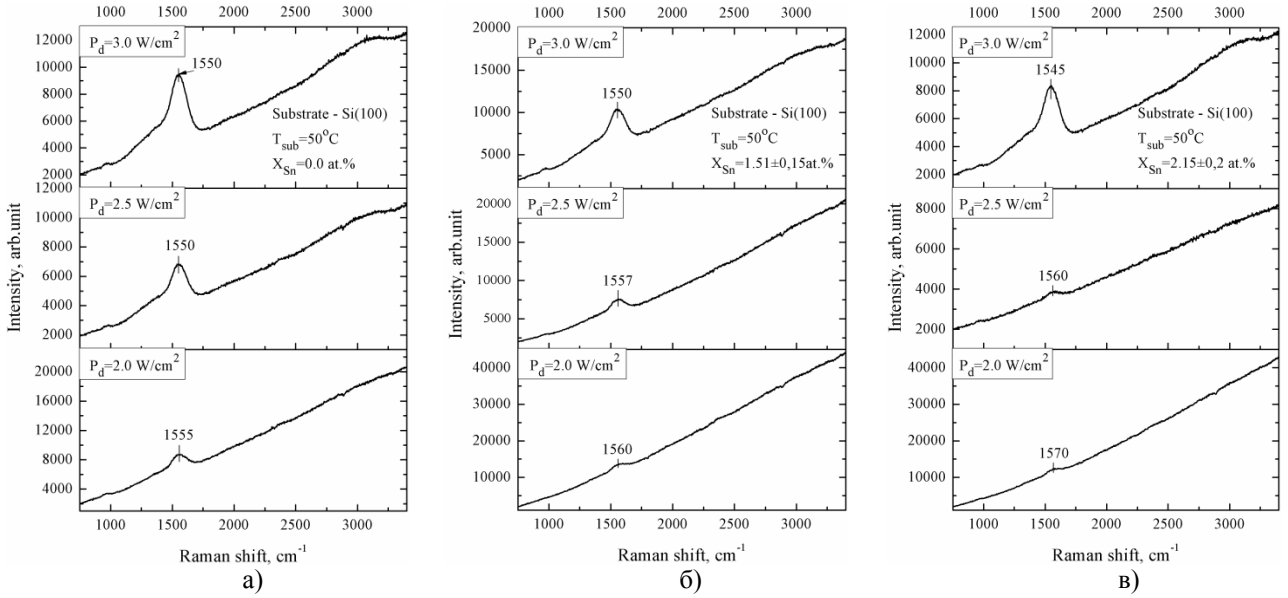


Рис. 4. Спектры КРС a-C:H<Sn_x> пленок синтезированные при разных значениях P_d и T_{sub}=50°C

При сравнении рисунков 4(б) и 4(в) при P_d =3,0 Вт/см^{2}уменьшение ФЛ с увеличением концентрации олова >2 ат.% можно связать с увеличением зоны или уменьшением плотности состояний на границах зон, что вызвано увеличением концентрации sp^3 узлов.

Заключение

В работе впервые показана возможность синтеза изолированных наночастиц олова в аморфной гидрогенизированной углеродной матрице. Методом комбинационного рассеяния света изучено влияние условий синтеза и наночастиц олова на формирование структуры углеродной матрицы. Так как олово может существовать в α-Sn и β-Sn модификациях, то в зависимости от условий синтеза в углеродной матрице реализуется одна из модификаций олова. Формирование наночастицы Sn оказывает определенное влияние на формирование структуры углеродной пленки, что приводит к изменению ее свойств, например, проявление фотолюминесценции.

Кроме этого показано существенное влияние температуры синтеза на структуру a-C:H пленок. Увеличение температуры приводит к увеличению структур из sp^2 узлов и формированию графитоподобной матрицы. В тоже время увеличение энергии конденсируемых частиц способствует увеличению формирования sp^3 узлов в a-C:H структуре и переходу ее в алмазоподобную матрицу.

Нужно отметить, что наночастицы олова при низких энергиях синтеза создают условия для формирования sp^2узлов, при увеличении энергии синтеза наблюдается увеличение sp^3 узлов, согласно смещению положения G пика.

Нами показана возможность влияния некарбидообразующих наночастиц на структуру и свойства a-C:H пленок, которые могут стать основой для создания новых устройств в микро- и наноэлектронике.

Работа выполнена в рамках грантового финансирования 3219/ГФ комитета науки МОН РК.

Библиографический список

1. Д.М.Мамырбаева, О.И.Юхновец, Б.Е.Алпысбаева, Р.Р.Немкаева, Р.К.Алиаскаров, А.П.Рягузов. Изучение особенностей структуры и оптических свойств аморфных углеродных пленок синтезированных ионно-плазменным методом //Труды VIII Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур». 14 – 18 сентября, Рязань, Россия. -2015. –Т.3. –С.228-233
2. A.P.Ryaguzov, G.A.Yermekov, T.E.Nurmamytov, R.R.Nemkayeva, N.R.Guseinov, R.K.Aliaskarov Visible Raman spectroscopy of carbon films synthesized by ion-plasma sputtering of graphite //J.Mater.Res. -2016. -V.31. -№1. –P.127-136.
3. J.Robertson Diamond-like amorphous carbon // Materials Sci. and Eng. R. -2002. –V.37. –P.129-281.

4. A.Gangopadhyay Mechanical and tribological properties of amorphous carbon films //Tribology Letters. -1998. -V.5. -№1. -P.25-39.
5. P.W.Shum, Z.F.Zhou, K.Y.Li, C.Y.Chan Mechanical and tribological properties of amorphous carbon films deposited on implanted steel substrates //Thin Solid Films. -2004. –V.458. -P. 203–211.
6. Yo. Wanga, H. Lia, L.Jia, F. Zhaoc, Q. Konga, Y. Wanga, X. Liua, W. Quana, H. Zhoua, J. Chena Microstructure, mechanical and tribological properties of graphite-like amorphous carbon films prepared by unbalanced magnetron sputtering //Surface and Coatings Technology, -2011. -V.205. -№8–9. -P.3058–3065.
7. Sh.Sh.Sarsembinov, O.Yu.Prikhodko, A.P.Ryaguzov, S.Ya.Maksimova, E.A.Daineko, F.A.Mahmoud Electronic properties of diamond-like carbon films modified by silver nanoclusters// Phys. Status Solidi C. -2010. –Vol.7, №3–4. –P.805– 807.
8. A.P.Ryaguzov, B.E.Alpysbayeva, R.R.Nemkayeva, R.K.Aliaskarov, D.M.Mamyrbayeva, O.I.Yukhnovets Structure and properties dependence of hydrogenated carbon films on conditions of synthesis at $Ar+CH_4+H_2$ plasma //Eur.Phys.Tech.J. -2016. -V.13. -№1(25). –P.52-59.
9. A.C.Ferrari, J.Robertson Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond–like carbon, and nanodiamond // Philos.Trans.R.Soc. -2004. -A362. –P.2477-2481.
10. A.C.Ferrari, J. Robertson Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon //Physical Review B. -2000 -V.61, Issues 20. -P.14095-14107.
11. A.C.Ferrari,J.Robertson Origin of the 1150-cm^{-1} Raman mode in nanocrystalline diamond // Physical Review B. -2001 -V.63, -P.121405-1-4.

УДК 53.082.7; ГРНТИ 29.03.35

РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ ТОКА НЕСТАЦИОНАРНОЙ ФОТОПРОВОДИМОСТИ

Д.С. Кусакин, В.Г. Мишустин, А.Г. Романов
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, diman.62.91@mail.ru, vgmish@yandex.ru, alex7371@yandex.ru

Аннотация. Работа посвящена разработке измерительной ячейки для измерительно-аналитического комплекса, реализующего метод компенсации тока нестационарной фотопроводимости. Разработаны принципиальная электрическая схема измерительной ячейки, топология печатной платы, сформулированы требования к корпусу. Все компоненты измерительной ячнйки изготовлены и смонтированы.

Ключевые слова: метод компенсации тока нестационарной фотопроводимости, измерительная ячейка, печатная плата.

DEVELOPMENT OF THE MEASURING CELL FOR IMPLEMENTATION OF TRANSIENT PHOTOCONDUCTIVITY COMPENSATION METHOD

D.S. Kusakin, V.G. Mishustin, A.G. Romanov
Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, diman.62.91@mail.ru vgmish@yandex.ru, alex7371@yandex.ru

Abstract. This paper is devoted to development of the measuring cell for measuring analytical complex which implements transient photoconductivity compensation method. The measuring cell circuit diagram and printed circuit board topology are worked out, requirements to the shell is formulated. All components of the measuring cell are fabricated and installed.

Keywords: transient photoconductivity compensation method, measuring cell, printed circuit board.

1. Введение

Метод компенсации тока нестационарной фотопроводимости (МКТНФ) основан на регистрации тока через барьерную структуру в момент освещения ее светом с заданной длиной волны. Чтобы реализовать такой метода необходима система, позволяющая подавать на исследуемую структуру импульс монохроматического излучения и напряжение от внешнего источника, при этом необходимо измерять фототок в исследуемой структуре. Для реализации метода требуется четкая синхронизация момента подачи оптического импульса и компенсирующего поля. При этом необходимо иметь возможность изменять время задержки между оптическим и электрическим воздействием.

Функциональная схема МКТНФ – установки показана на рисунке 1. Источником оптического излучения является импульсная лампа (ИЛ), которая управляется с помощью схемы управления импульсной лампой (СУИЛ). Управление измерительной установкой осуще-

ствляется программой, имитирующей виртуальный прибор (ВП), выполненной в среде инженерного графического проектирования LabVIEW 2009. Передача сигналов управления и измеряемых сигналов в ПК осуществляется с использованием платы расширения NI PCI6251 и подключенного к ней терминального блока BNC2120.

Запуск импульсной лампы осуществляется положительным импульсом длительностью 500 мкс (вывод PFI12 терминального блока). Импульс формируется счетчиком по каналу Ctr0, ИЛ срабатывает по заднему фронту этого импульса. Одновременно формируется положительный импульс, поступающий на ключ S1 и удерживающий заданное напряжение на исследуемой структуре. Этот импульс формируется счетчиком по каналу Ctr1 (вывод PFI13) и определяет момент подачи на исследуемую структуру электрического поля, которое вырабатывается каналом AO0 ЦАП. Изменяя длительность этого импульса, можно формировать электрическое поле на структуре с некоторым опережением или запаздыванием по отношению к импульсу оптического излучения.

Импульсная лампа формирует световой поток, который фиксируется фотодиодом (ФД), преобразуется в импульс напряжения и усиленный усилителем фотодиода (УФД) запускает АЦП (канал AI0 терминального блока BNC2120). Для запуска АЦП используется вход PFI0 терминального блока. Измерительная ячейка (ИЯ) с исследуемой структурой освещается монохроматическим световым потоком, и ток через исследуемую структуру по дается на токовый резистор RT. Усилитель токового резистора (УТР) предназначен для согласования входных и выходных сопротивлений схемы.

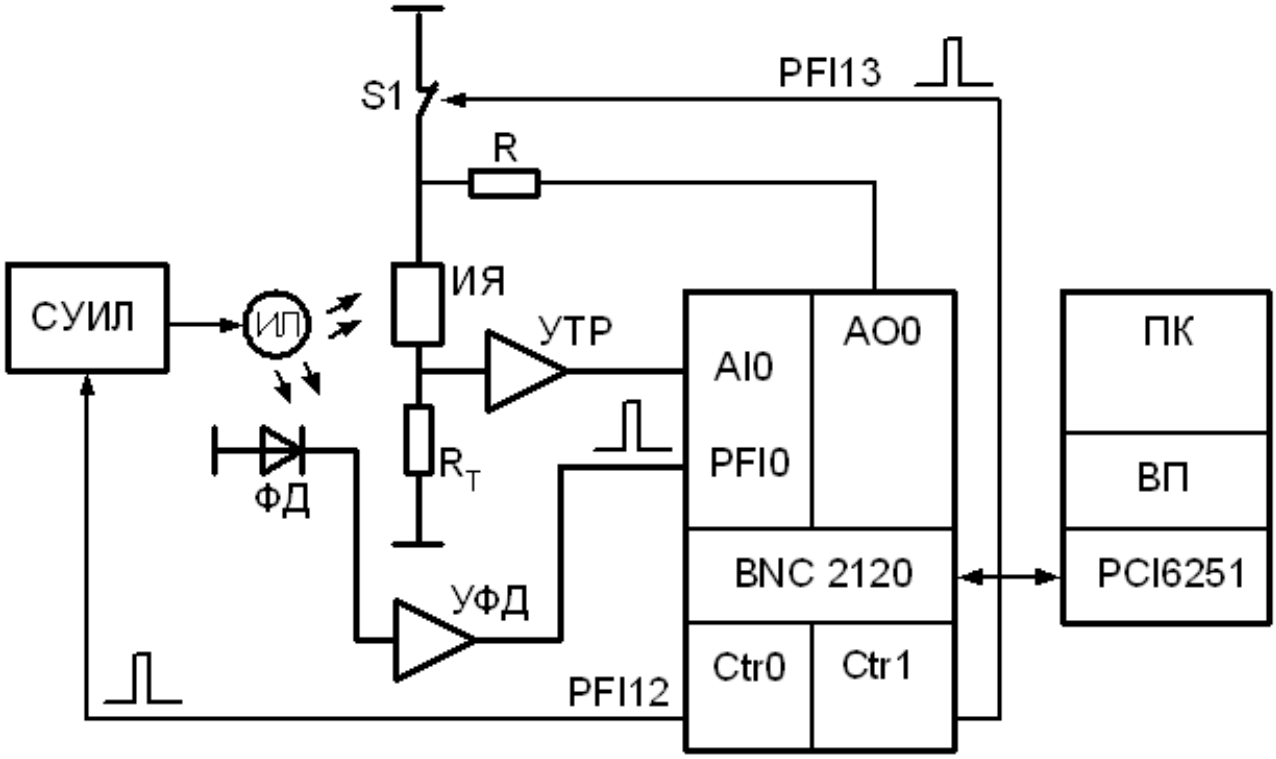


Рис. 1. Функциональная схема МКТНФ-установки

Сформированные с помощью АЦП цифровые отсчеты, соответствующие величине тока через исследуемую структуру, записываются в файл, сохраняются и могут выводится для анализа в табличном виде или в виде графика.

Используемый до настоящего момента в установке МКТНФ прототип ИЯ имеет следующие недостатки:

- питание электрической платы ИЯ осуществляется от внешнего источника напряжения, что влечет за собой наводки частотой 50 Гц от электрической цепи;

- соединительные дорожки между элементами платы расположены на небольшом расстоянии друг от друга, вследствие чего возникают большие паразитные ёмкости, что ограничивает быстродействие измерительной схемы;
- коммутация образца к измерительной схеме производится посредством пайки, что приводит к износу элементов схемы.

Таким образом, целью данной работы является устранение недостатков, имеющихся у прототипа разрабатываемой измерительной ячейки.

2. Разработка измерительной схемы для ИЯ

Принципиальная схема измерительной ячейки с соответствующими номиналами представлена на рисунке 2. Номиналы резисторов подбираются в соответствии с требуемым коэффициэнтом усиления. В качестве прецезионного усилителя в данной схеме используется ОУ AD8066AR, обладающий высоким быстродействием и низким уровнем собственных шумов. При широком диапазоне напряжений питания (от 4 В до 24 В) и полосе пропускания до 150 МГц выбранный ОУ удовлетворяет всем требованиям для применения в измерительной схеме ИЯ. Преимущества AD8066AR: скорость нарастания напряжения – 180 В/мкс, низкий уровень искажений, низкое напряжение входного смещения – до 1 мВ.

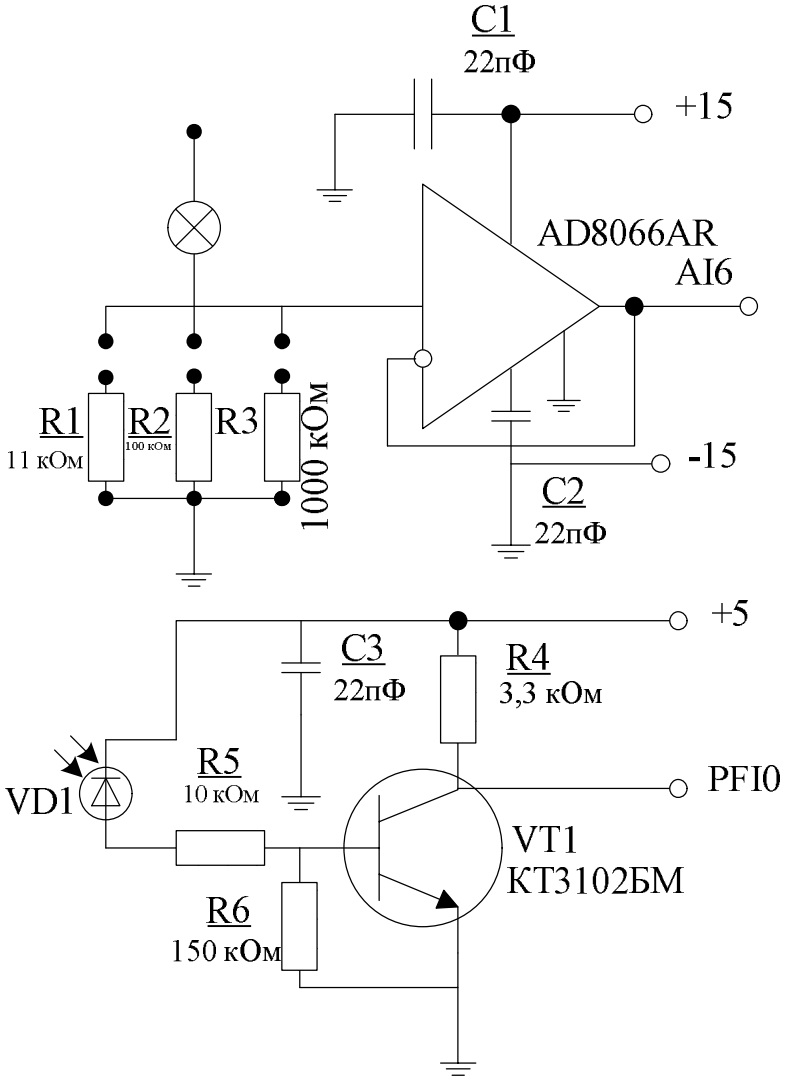
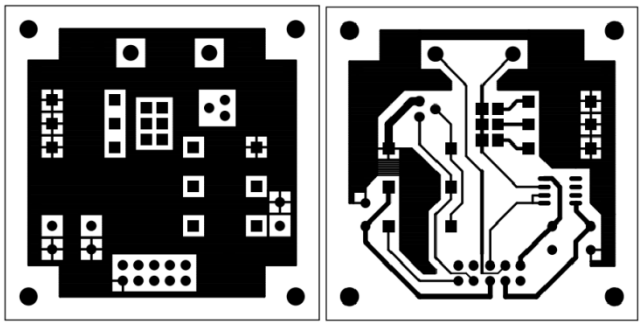


Рис. 2. Принципиальная схема измерительной ячейки

Следующим этапом разработки стала предварительная компоновка элементов. Расположение компонентов и соединительных дорожек должно учитывать требования по быстродействию схемы, минимизировать паразитные емкости, а также обеспечивать контакты для

подключения внешнего интерфейса и соответствовать требуемым габаритам печатной платы (50 мм х 50 мм) исходя из размеров посадочного места в корпусе ИЯ.



а) б)

Рис. 3. Трассировка печатной платы в САПР Altium Designer, а) – нижний слой ПП; б) – верхний слой ПП

Трассировка разработанной печатной платы была выполнена в САПР радиоэлектронных устройств Altium Designer, топология платы представлена на рисунке 3. После выбора оптимального расположения посадочных мест и соединительных дорожек была проведена проверка платы на ошибки (DRC, Design Rules Check): проверка на зазоры, замыкания, наложения компонентов.

3. Разработка корпуса для ИЯ

Корпус существующего прототипа ИЯ изготовлен из фольгированного стеклотекстолита. Этот материал не обеспечивает надежного экранирования измерительной схемы от электромагнитного импульса, возникающего при срабатывании ИЛ. Для устранения указанного недостатка в качестве материала корпуса разрабатываемой ИЯ выбран пермаллой. Этот спав является лучшим материалом по отношению к стеклотекстолиту, так как обеспечивает надежную защиту от вшешних воздействий, что является важным фактором при измерении малых значений переходного фототока. Корпус имеет габариты 89×90×91 Модель корпуса ИЯ, разработанная в программной среде САПР SOLIDWORKS, представлена на рисунке 4.

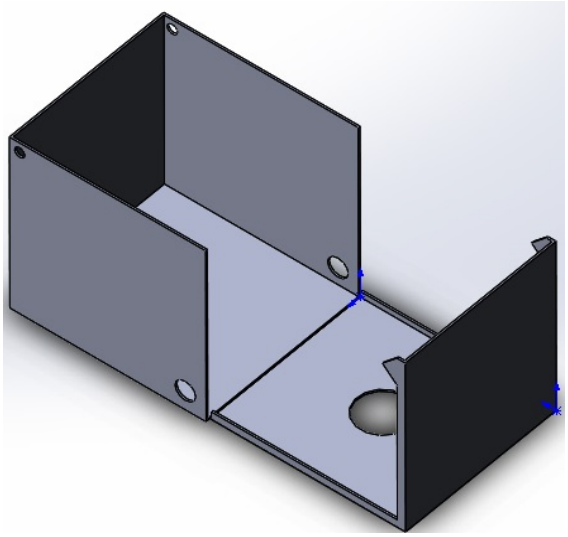


Рис. 4. Модель корпуса ИЯ, разработанная в программной среде САПР SOLIDWORKS

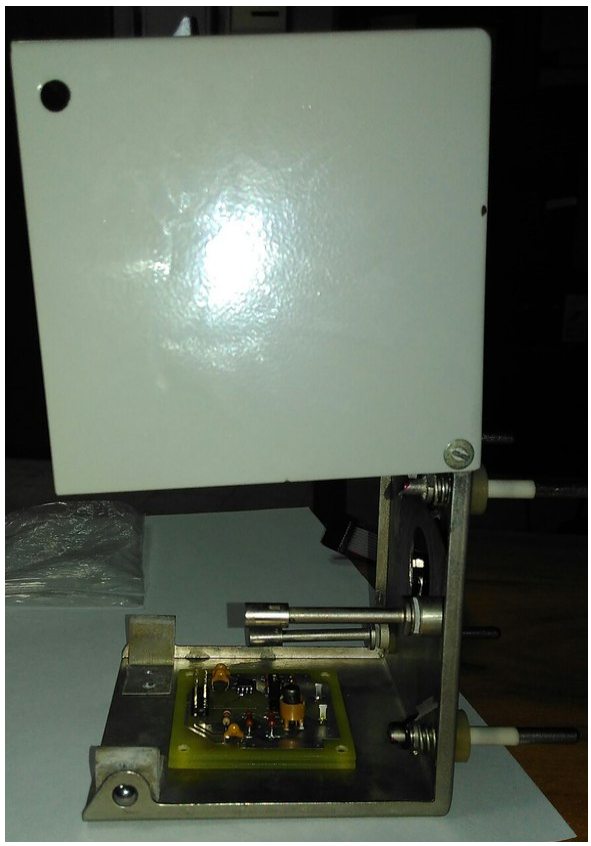


Рис. 5. Компоненты ИЯ в сборе

В соответствии с требованиями, сформулированными к компонентам измерительной ячейки на этапе проектирования, были изготвлены корпус ИЯ и печатная плата. Внешний вид измерительной ячейки на этапе предварительной сборки представлен на рисунке 5.

Выводы

Разработанная ИЯ для МКТНФ-установки (рис. 5) позволяет проводить исследования барьерных структур на основе полупроводниковых материалов с низкой подвижностью носитлей заряда. Разработанная ИЯ обеспечивает измерение малых токов с большей степенью точности по сранению с существующим прототипом. Это реализуется за счет автономной системы питания, не имеющей гальванической связи с сетью переменного тока, улучшенными характеристиками корпуса с точки зрения экранирования измерительной схемы от внешнего электромагнитного воздействия за счет использования пермаллоя, а также повышения быстродействия и снижения собственных шумов за счет перепроектирования печатной платы с учетом выявленных недостатков прототипа.

Исследуемаяя структура коммутируется к измерительной схеме с помощью специальных разъемов, что улучшает качество электрических контактов, а также исключает механическое и тепловое воздействие на измерительную схему при инсталяции образца в измерительную ячейку. Обмен сигналами управления с ПК идет по протоколу RS – 232 через экранированный кабель.

Таким образом, в результате выполнения работ устранены все недостатки, выявленные при опытной эксплуатации прототипа измерительной ячейки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-32-00342) с ипользованием оборудования РЦЗМкп при Рязанском государственном радиотехническом университете (ckp.rsreu.ru) в НОЦ неупорядоченных и наноструктурированных материалов и устройств на их основе.

Библиографический список

1. С.П. Вихров, Н.В. Вишняков, В.Г. Мишустин Физические процессы в барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников: учебное пособие. Саратов: Вузовское образование, 2005. - 75 с.
2. Бодягин Н.В., Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г. Физические процессы в барьерных структурах на основе неупорядоченных и наноструктурированных полупроводников // Радиотехника, №3, 2012. С. 81 – 88.
3. Суранов А. Я. LabVIEW:Справочник по функциям. – М.: ДМК Пресс, 2014, 536 с.
4. Лопаткин А. В., Проектирование печатных плат в Altium Designer. – М.: ДМК Пресс, 2015, 400 с.

УДК 621.378.324

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО УГЛЕРОДА В КАЧЕСТВЕ ЭМИССИОННОГО ПОКРЫТИЯ КАТОДОВ ТЕА - CO_2 ЛАЗЕРОВ

Н.Т. Май, Б.А. Козлов

Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, foton@rsreu.ru

Аннотация. Использован наноструктурированный углерод, получаемый электродуговым методом в качестве покрытия рабочей поверхности катода ТЕА - CO_2 лазера. Зафиксировано увеличение тока накачки и энергии излучения в импульсе в результате увеличения автоэмиссионного тока с катода.

Ключевые слова: наноструктуры, углерод, ТЕА-CO_2 лазера, автоэмиссионный ток с катода.

USING NANOSTRUCTURED CARBON AS EMISSION COATING OF CATHODES IN TEA - CO_2 LASERS

N.T. Mai, B.A. Kozlov

Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, Russia, foton@rsreu.ru

Abstract. Used nanostructured carbon produced by the electric arc method of coating the working surface of the cathode of TEA - CO_2 laser. Recorded an increase in the pumping current and energy measurement pulse as a result of increasing autoemission current from the cathode.

Keyword. nanostructures carbon, TEA-CO_2 laser, field emission current from the cathode.

ТЕА-CO_2 лазер - этот лазер с поперечным возбуждением, работающий при атмосферном давлении рабочей смеси газов ("TEA" - сокращение от английского Transversely Excited Atmospheric (pressure)). Структурная схема ТЕА-CO_2 лазера приведена на рисунке 1.

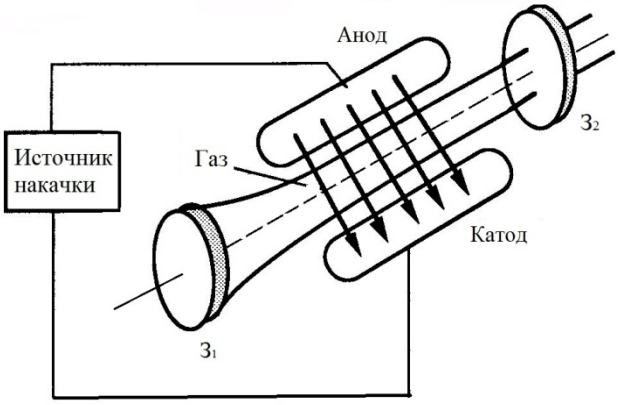


Рис. 1. Схема взаимного расположения электродов и оптического резонатора ТЕА-CO_2 лазер: анод и катод для зажигания поперечного разряда; $З_1$ и $З_2$ – зеркала резонатора

Увеличение энергии и мощности излучения ТЕА-CO_2 лазеров главным образом связано с увеличением концентрации рабочих молекул и энергии накачки. Величина энергии накачки может быть увеличена в результате повышение тока газового разряда, в плазме которого осуществляется накачка. Величина тока газового разряда высокого давления может быть увеличена в результате увеличения автоэмиссионного тока с катода.

В настоящей работе изучение влияние покрытия катода пленкой из наноструктурированого углерода на величину автоэлектронного тока с катода, ток накачки, энергию накачки и величину энергии излучения в импульсе малогабаритного TEA-CO_2 лазера. Наноструктурированный углерод был получен на установке электродугового синтеза. Наноструктурированный углерод наносился на поверхность катода из водного раствора. Установлены увеличения значений автоэлектронных токов, токов накачки и значений энергий накачки и излучения.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.19.31

АНАЛИЗ ОБЪЕМНОГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМАХ РЕКОМБИНАЦИИ В СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

А.В. Ермачихин, А.Д. Маслов
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, Maslov.a.d@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрен аналитический подход к изучению времени жизни носителей заряда. Проведена оценка времени жизни носителей заряда в мультикристаллических кремниевых солнечных элементах на основе математической модели и электрофизических экспериментальных исследований тестовых структур методом ВФХ и спектроскопии НЧ шума.

Ключевые слова: солнечные элементы на основе мультикристаллического кремния, время жизни носителей заряда, механизмы рекомбинации.

ANALYSIS OF BULK CHARGE CARRIER LIFETIME DEPENDING ON DIFFERENT RECOMBINATION PROCESSES IN MULTICRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS

A.V. Ermachikhin, A.D. Maslov
Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, Maslov.a.d@mail.ru

Abstract. In this paper an analytical approach to investigate charge carrier lifetime is considered. Charge carrier lifetime in multicrystalline silicon solar cells is estimated by mathematical calculations and experimental data obtained from C-V and LFN spectroscopy measurements.

Keywords: multicrystalline silicon solar cells, charge carrier lifetime, recombination processes.

В наши дни наиболее широкое распространение получили солнечные элементы (СЭ) на основе мультикристаллического кремния. По сравнению с монокристаллическими структурами они менее эффективны, имеют меньший срок службы из-за наличия дефектов в поликристаллической структуре. Однако себестоимость производства таких элементов намного ниже, что обуславливает их повсеместное применение [1].

Эффективность фотопреобразования и срок службы этих элементов ограничены наличием глубоких уровней в запрещенной зоне структуры, которые участвуют в захвате и рекомбинации носителей заряда, ограничивая тем самым концентрацию носителей заряда, подвижность, диффузионную длину и время жизни носителей заряда [2].

В рамках данной работы была поставлена задача исследовать солнечные элементы на основе мулькристаллического кремния: уточнить аналитическим и экспериментальным способом время жизни носителей заряда, оценить вклад различных механизмов рекомбинации на время жизни. Новизна данной работы заключается в комплексном сочетании аналитических и экспериментальных электрических методов для оценки времени жизни носителей заряда и процессов рекомбинации в солнечных элементах на основе мулькристаллического кремния.

Согласно математической модели, предложенной в [3], для кристаллического солнечного элемента на основе кремния напряжение холостого хода V_{OC} в случае базы p-типа проводимости можно найти как:

$$Voc = \frac{kT}{q}\ln(\frac{\Delta pNa}{ni_i^2}) + \frac{kT}{q}\ln(1+\frac{\Delta p}{Na}) \qquad 1)$$

где k — постоянная Больцмана, T — температура СЭ, q — элементарный заряд, Δp — избыточная концентрация электронно-дырочных пар в базе, Na — концентрация легирующей примеси, $n_i(T)$ — концентрация собственных носителей заряда в кремнии.

Таким образом, при известном значении Voc выражение (1) представляет собой квадратное уравнение относительно Δp. Его решением является:

$$\Delta p = -\frac{Na}{2} + \sqrt{\frac{Na_i^2}{4} + ni_i^2 \exp(\frac{qVoc}{kT})} \qquad 2)$$

Использование уравнения баланса генерационно-рекомбинационных процессов в данном случае позволяет найти величину объемного времени жизни носителей заряда:

$$\frac{Isc}{q} = (\frac{d}{\tau b} + S)\Delta p_n \qquad 3)$$

где J_{SC} — плотность тока короткого замыкания, S – скорость поверхностной рекомбинации, d-толщина кремниевой подложки.

Отсюда:

$$\tau b = \frac{d\Delta p}{\frac{Isc}{q} - S\Delta p} \qquad 4)$$

С другой стороны результирующее объемное время жизни это сумма:

$$\tau b = (\tau_{SR}^{-1} + A(Na + \Delta p) + \tau_{Auger}^{-1})^{-1} \qquad 5)$$

τSR — время жизни носителей заряда при рекомбинации Шокли−Рида−Холла, A ≈ 6 · 10−15 см3 /с — коэффициент излучательной рекомбинации в кремнии, τAuger — время жизни носителей заряда при оже-рекомбинации.

$$\tau_{Auger}^{-1} = Cp(Na + \Delta p)\Delta p + Cn(Na + \Delta p)^2 \qquad 6)$$

где $C_n = (2.8 \cdot 10^{-31} + 2.5 \cdot 10^{-22}/(N_d + \Delta p)^{0.5})$см^6 /с, $C_p = 10^{-31}$ см^6 /с.

Таким образом, зная такие характеристики готовых элементов, такие как напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, скорость поверхностной рекомбинации, концентрацию легирующей примеси, толщины слоев можно оценить вклад различных механизмов рекомбинации на время жизниносителей заряда. Некоторые из перечисленных характеристик могут быть получены экспериментально комплексным набором электрофизических методов.

Для исследования были выбраны тестовые образцы солнечных элементов на основе мультикристаллического кремния размеров 1 см2 производства компании ООО «Гелиос-Ресурс». Структура представляет из себя подложку фотоактивного p-слоя мультикристаллического кремния (0.5-2 Ω·см) с нанесенным слоем n-типа кремния, фронтальном атриотражающим покрытием на основе нитрида кремния и серебрянными контактами. Эффективность фотоэлектрического преобразования исследуемых структур составляет 10%, напряжение холостого хода Voc = 0.6 В и плотностью тока короткого замыкания Jsc = 0.8·10-3 А.

Солнечные элементы были исследованы на специально разработанном измерительном комплексе на базе криостата замкнутого цикла Janis CCS-400/204n, управляемого температурным контроллером LakeShore 335, электрометра Keithley 6517B, RLC измерителем Agilent E4980A с Option 001 и малошумящего усилителя [4].

Измерительный комплекс (рис. 1) включает в себя несколько измерительных методик:

- спектроскопия низкочастотного шума;
- ВАХ;
- ВФХ и спектроскопия адмиттанса;
- токовая релаксационная спектроскопия глубоких уровней.

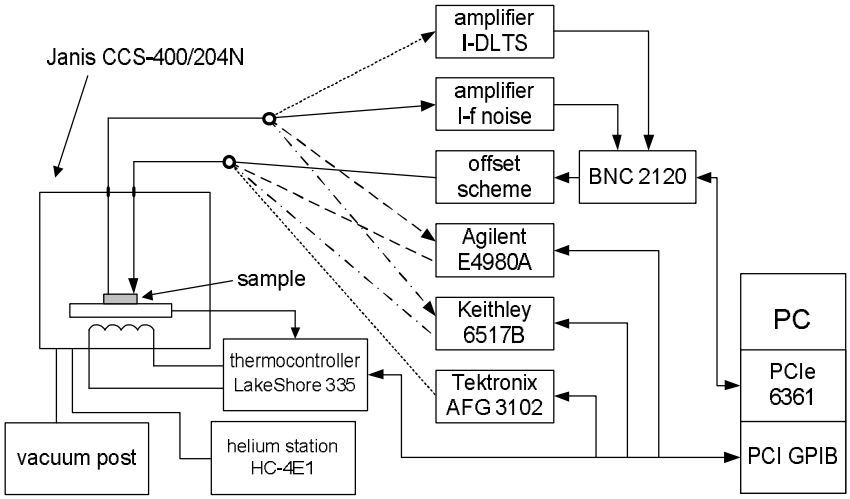


Рис. 1. Схема измерительного комплекса

Программное обеспечение комплекса реализовано в среде инженерно-графического программирования LabVIEW с использованием библиотек Agilent E4980.lvlib, Keithley 6517.lvlib и Lake Shore 335.lvlib, что позволило снизить временные затраты на разработку управляющей программы для измерительного комплекса. Управление схемой смещения и усилителем происходит при помощи shielded connector block NI BNC 2120 and data acquisition NI PCIe 6361.c

Для оценки неравновесной концентрации носителей заряда согласно (2) кроме основных электрических характеристик прибора необходимо знать концентрацию легирующей примеси. Для этого у исследуемых структур был измерен профиль концентрации (рис. 2) методом вольт-фарадных характеристик.

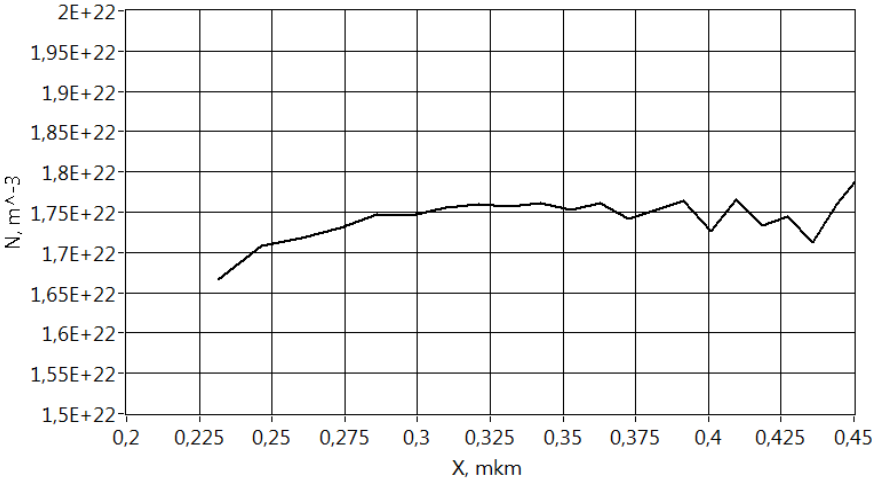


Рис. 2. Профиль концентрации носителей заряда солнечного элемента на основе мультикристаллического кремния

Видно, что Na=1.75·1016см-3. Соответственно при Voc = 0.6 V избыточная концентрация согласно (2) составила 1,5·1014 см-3.

Используя (3) при Jsc = 0.8·10-3 A и допущении, что S~40 см/с [5] время жизни носителей заряда равно 3,6·10-5с.

Для оценки справедливости подхода время жизни было измерено экспериментально при помощи метода низкочастотного шума (рис. 3).

На рисунке 3 представлена зависимость спектральной плотности мощности исследуемой структуры от частоты, на котором наглядно видно излом при частоте порядка 3 кГц. Поскольку частота излома соответствует $f=1/2\pi\cdot\tau$ [6], то экспериментальное время жизни равно 5·10-5 с, что хорошо согласуется с аналитическим значением, подтверждает справедливость подхода и допущения о скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда.

Определено, что именно рекомбинация по Шоккли-Холу-Риду вносит основной вклад в низкое время жизни (5,6). Соответственно, при рекомбинации через глубокие уровни время жизни составило $3{,}585\cdot10^{-5}$ с.

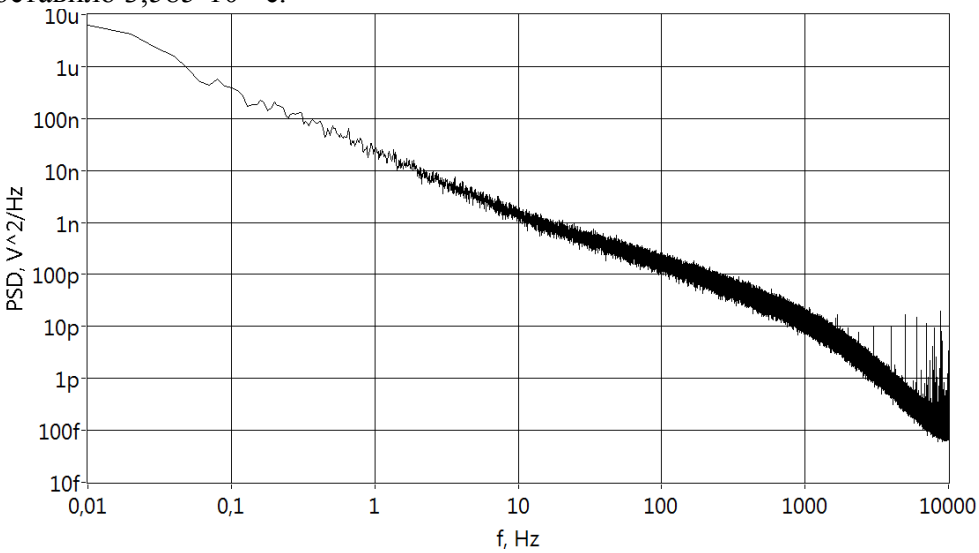


Рис. 3. Зависимость спектральной плотности мощности шума от частоты солнечного элемента на основе мультикристаллического кремния

Таким образом, в данной работе были исследованы образцы мультикристаллических солнечных элементов экспериментальными электрическими методами. Был определен вклад рекомбинации по Шоккли-Холу-Риду в общее объемное время жизни. Аналитически и экспериментально получены хорошо согласующиеся значения объемного времени жизни.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации МК-4518.2016.2 на оборудовании РЦЗМкп при ФГБОУ ВО «РГРТУ» в НОЦ неупорядоченных и наноструктурированных материалов и устройств на их основе (ННМУ).

Библиографический список

1. Status of Amorphous and Crystalline Thin-Film Silicon Solar Cell Activities. B. von Roedern. National Center for Photovoltaics and Solar Program Review Meeting Denver, Colorado March 24-26, 2003.
2. Investigation of the influence of deep-level defects on the conversion efficiency of Si-based solar cells. Vladimir G. Litvinov, Nikolay V. Vishnyakov, Valery V. Gudzev, Nikolay B. Rybin, Dmitry S. Kusakin, Alexander V. Ermachikhin, Sergey M. Karabanov, Sergey P. Vikhrov, Andrey S. Karabanov and Evgeny V. Slivkin // MRS Advances / Volume 1 / Issue 14 / January 2016, pp 911 – 916. DOI: 10.1557/adv.2016.42
3. The method for optimizing parameters of heterojunction photovoltaic cells based on crystalline silicon. A.V. Sachenko, Yu.V. Kryuchenko, V.P. Kostylyov, I.O. Sokolovskyi, A.S. Abramov , A.V. Bobyl , I.E. Panaiotti , E.I. Terukov // Semiconductors, 2016, V.50,2, pp. 259-263
4. The measuring systems of semiconductor structures and its software. A.V. Ermachikhin ; V.G. Litvinov ; A.D. Maslov. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147318
5. Recombination and Trapping in Multicrystalline Silicon. Cuevas, A.; Stocks, M.; McDonald, D.; Kerr, M.; Samundsett, C.. IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 46, issue 10, pp. 2026-2034. DOI: 10.1109/16.791992
6. T.A. Kholomina. S.A.. Kostryukov, A.S. Laktyushkin. Investigation of semiconductor barrier structures by low-frequency noise spectroscopy method. Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University. Volume 39, Issue 1. pp 74-78

УДК ; ГРНТИ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ В КАЧЕСТВЕ ЭМИССИОННОГО ВЕЩЕСТВА ДЛЯ ЭЛЕКТРОДОВ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДНИКОВ

И.И. Баранов, Д.С. Макеев

Рязанский государственный радиотехнический университет

Россия, Рязань

Аннотация. В данной работе исследована возможности использования щелочных металлов в качестве эмиссионного вещества для электродов искровых разрядников

Ключевые слова: щелочное металлы, искровые разрядники

STUDY THE POSSIBILITY OF USING ALKALI METALS AS EMISSIVE MATERIALS FOR THE ELECTRODES OF THE SPARK GAPS

I. Baranov, D. Makeev

Ryazan state radio engineering University

Russia, Ryazan

Abstract. This paper deals with the investigate the possibility of using alkali metals as emissive materials for the electrodes of the spark gaps

Keywords: alkali metals, spark gaps.

1.Введение

Надежную защиту электронной аппаратуры и устройств связи от воздействия импульсного перенапряжения обеспечивают неуправляемые разрядники с малым временем запаздывания пробоя.

В настоящее время в газоразрядных приборах применяют в основном активные катоды, в состав которых введены вещества, снижающие работу выхода. Одним из путей создания катодов с малой работой выхода является применение соединений щелочных металлов, например, алюмосиликатов или алюминатов, с определенной структурой, способствующей сравнительно легкому выделению из них щелочного металла.

В НИИ ГРП «Плазма» разработаны и производятся разрядники «кнопочной» конструкции серии Р-150 – Р-159. В основе конструкции этих разрядников заложен электрод, выполненный в виде металлической чашки с закрепленной на ней «таблеткой» (рис. 1). Основу «таблетки» составляет металлопористая матрица прессованного порошка никеля и алюмосиликата цезия, как активного вещества.

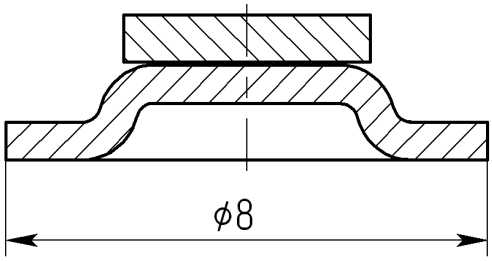


Рис. 1. Электрод разрядника «кнопочной» конструкции

По известным литературным данным, в качестве электродов аналогичных приборов ряда зарубежных производителей используются и другие вещества и композиции, содержащие щелочные металлы и их соединения как основное эмиссионное вещество.

Химический состав вещества может включать в себя такие компоненты как вольфрамат калия (K2WO4) или вольфрамат цезия (Cs2WO4), силикат натрия (Na2SiO3) или силикат цезия (Cs2SiO3) в качестве базовых компонентов, и титан или оксид титана (TiO2), тетраборат натрия (Na2B4O7), оксид магния (MgO) и т.п. в качестве добавок.

Приборы, изготовленные с использованием таких электродов, отличаются высокой надежностью и стойкостью к воздействию электрических нагрузок.

2.Описание эксперимнта

Целью данной работы является поиск новых эмиссионных материалов на основе щелочных металлов, а также композиций на их основе, способных заменить существующую

технологию получения электродов, при этом сократить технологический цикл их изготовления и повысить надежность и стабильность срабатывания приборов.

В данной работе экспериментальные образцы выполнялись на основе разрядников серии Р-150 – Р-159.

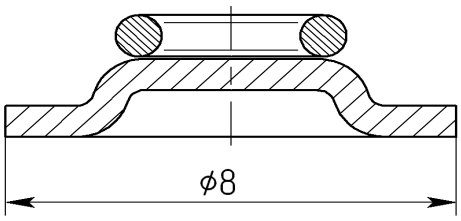


Рис. 2. Конструкция электрода экспериментального образца разрядника

Конструкция электрода представляет собой чашку и кольцо, приваренное к поверхности чашки (рис. 2). В образовавшейся емкости внутри кольца размещается активное вещество. Основу активного вещества составляют соли щелочных металлов (калия или натрия). В качестве добавок используются такие вещества как алюмосиликат бария- кальция или окись кремния и окись алюминия, а также металлические добавки порошков металлов, таких как никель, титан, или молибден.

Рассмотрим подробнее состав веществ эмиссионных композиций, их назначение и влияние на свойства прибора.

Основные требования, предъявляемые к свойствам веществ эмиссионных композиций, следующие:

способность к эмиссии (низкая работа выхода)

способность к газопоглощению

температура плавления не более 800°С (по крайней мере одного компонента)

Наиболее предпочтительными являются композиции, включающие в свой состав йодид калия (KI) или хлорид калия (KCl), а также хлорид натрия (NaCl) в качестве основных веществ. Температуры плавления этих веществ находятся в пределах ~680–800°С. Такой температурный режим может обеспечиваться непосредственно при пайке прибора, что позволяет не проводить дополнительной температурной обработки перед сборкой прибора. В процессе пайки прибора температура достигает ~800°С. При этой температуре KI/KCl (NaCl) расплавляются с частичным разложением и выделением ионов K^+(Na^+). Остывая, эти вещества образуют твердый расплав, надежно удерживающийся на поверхности чашки. Функционально эти вещества исполняют роль «матрицы» электрода, так и основного эмиссионного элемента.

В качестве добавок к основному веществу были выбраны алюмосиликат бария-кальция и добавки порошков никеля, титана, или молибдена. Алюмосиликат бария-кальция, обладая способностью к газопоглощению, также обладает и эмиссионными свойствами. Добавление никеля, титана или молибдена должно способствовать стабилизации эмиссии электрода, что уменьшит разброс статического напряжения прибора от пробоя к пробою.

Таким образом, были выбраны следующие составы:

- 70% KI, 20% алюмосиликат BaCa, 10% Ti
- 70% KCl, 20% алюмосиликат BaCa, 10% Ni
- 70% KCl, 20% алюмосиликат BaCa, 10% Mo
- 30% NaCl, 20% Al_2O_3, 50% SiO_2

На основе электродов с полученными эмиссионными составами были собраны и спаяны приборы, аналогичные выпускаемым серийно Р-157 с номинальным напряжением пробоя 600 В. После пайки приборов проводился замер статического напряжения пробоя. Затем приборы подвергались воздействию синусоидального тока амплитудой 5 А и длительностью 1 с (2 вкл.) и импульсов тока амплитудой 1 кА и длительностью 125 мкс, и снова за-

мерялось статическое напряжение пробоя. Результаты измерений до и после воздействия током приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1 - Синусоидальный ток

Состав 1: 70% KI, 20% алюмосиликат BaCa, 10% Ti		
№	$U_{ст.Л}$, В/ $U_{ст.П}$, В	$U_{ст.ср}$, В
1	547-546-586-596-594/603-593-597-597-592	573/596
2	571-537-548-575-591/560-552-564-596-603	564/575
3	684-554-620-609-622/532-606-592-594-585	617/581
4	608-564-561-570-566/491-528-546-503-567	573/527
5	580-594-586-524-549/562-491-498-501-549	566/520
Состав 2: 70% KCl, 20% алюмосиликат BaCa, 10% Ni		
6	541-539-547-535-562/545-399-411-428-479	544/432
7	585-479-439-499-498/612-472-559-530-520	500/539
8	761-666-558-627-675/712-565-564-585-599	657/605
9	555-489-477-481-505/633-527-554-557-571	501/568
10	623-629-562-586-578/434-459-503-500-495	595/478
Состав 3: 70% KCl, 20% алюмосиликат BaCa, 10% Mo		
11	878-875-866-871-864/687-705-694-675-678	870/687
12	620-617-624-611-614/670-639-639-626-626	617/640
13	717-695-614-692-690/432-417-386-390-394	681/403
14	935-895-906-907-909/876-916-918-917-919	910/909
15	613-539-546-547-507/556-546-545-542-545	550/546
Состав 4: 30% NaCl, 20% Al_2O_3, 50% SiO_2		
16	809-762-770-772-776/802-817-812-818-812	777/812
17	781-808-682-709-713/903-909-908-892-913	738/905
18	855-719-728-742-794/747-722-742-739-730	767/736
19	1010-878-803-813-859/839-758-771-763-761	872/778
20	809-808-728-813-781/761-739-781-722-758	788/752

Следует заметить, что основной задачей работы является поиск материала, который принципиально мог бы служить основой для электрода. Само по себе абсолютное значение статического напряжения пробоя не является критерием выбора эмиссионных составов. Основным критерием выбора следует считать стабильность работы электрода, т.е. желательно, чтобы разброс статического напряжения от пробоя к пробою был минимален.

Таблица 2 - Импульсный ток

Состав 1: 70% KI, 20% алюмосиликат BaCa, 10% Ti		
№	$U_{ст.Л}$, В/ $U_{ст.П}$, В	$U_{ст.ср}$, В
1	512-480-481-475-475/448-448-455-456-453	484/452
2	422-446-480-486-505/450-444-472-490-509	467/473
3	484-474-476-472-470/446-471-473-476-474	475/468
4	509-540-568-580-564/596-593-595-598-592	552/597
5	498-486-485-484-482/404-445-436-434-440	487/431
Состав 2: 70% KCl, 20% алюмосиликат BaCa, 10% Ni		
6	533-470-478-455-449/561-567-536-556-535	477/551
7	584-567-539-564-580/517-514-479-470-465	566/489
8	777-768-780-778-766/662-539-540-487-418	773/529
9	622-518-514-525-510/489-426-475-428-435	537/450
10	591-480-535-545-480/617-541-385-452-446	526/488
Состав 3: 70% KCl, 20% алюмосиликат BaCa, 10% Mo		
11	776-765-736-744-708/646-561-535-554-592	745/577
12	576-571-544-583-559/643-639-639-543-619	566/616
13	703-664-664-611-602/555-468-452-464-444	648/476
14	873-844-823-823-825/696-762-718-702-671	837/709
15	556-502-511-507-529/525-540-534-527-528	521/530
Состав 4: 30% NaCl, 20% Al_2O_3, 50% SiO_2		
16	782-718-678-685-683/640-643-641-652-652	709/645
17	843-808-822-809-818/751-788-785-790-790	819/780
18	732-742-741-742-742/735-748-755-759-762	739/751
19	879-795-795-793-790/771-800-799-803-806	810/795
20	778-763-765-782-762/781-739-751-742-748	770/752

Как ранее упоминалось, добавление порошков металлов позволяет несколько стабилизировать эмиссию электрода и уменьшить разброс статического напряжения прибора от пробоя к пробою. Лучше других эти свойства проявились в составе 1, в котором в качестве добавки служит титан. Из результатов таблицы нетрудно видеть, что добавление титана не только положительно влияет на разброс статического напряжения, но и снижает статическое напряжение пробоя в целом, что, при прочих равных условиях, позволяет говорить о лучшей активности электрода.

Состав 4, о котором не упоминалось ранее, также показал неплохие результаты в части стабильности работы электродов. Однако, как выяснилось в процессе испытаний, разрядники с электродами, выполненными на основе состава 4, не способны пропустить синусоидальный импульс длительностью 1 с. Происходит гашение разряда, видимо из-за слабой эмиссии электрода.

3. Выводы

В данной работе показана принципиальная возможность использования порошковых материалов в качестве эмиссионных составов для получения электродов. Подобрано несколько составов, которые могли бы служить основой для активной составляющей электродов и в дальнейшем заменить прессованные электроды. Преимущество такой технологии получения электродов видится в исключении из технологии производства ряда операций, таких как собственно прессование электродов и их предварительное спекание, что заметно облегчает и сокращает во времени технологический цикл производства разрядников.

Однако, существует ряд технологических проблем, связанных с производством разрядников на основе порошковых материалов. Во-первых, необходимо отработать технологию нанесения эмиссионного состава на поверхность электрода в части подбора химически неактивных жидкостей для приготовления суспензий и дозирования ее количества. Затем необходимо уточнить режимы откачки и пайки приборов с учетом полного удаления летучих компонентов. Применяя электроды на основе порошковых суспензий, нужно иметь в виду что процесс обезгаживания будет более длительным, чем существующий и проводить его следует при температуре, обеспечивающей плавление основного компонента. Во-вторых, в процессе испытаний выяснилось, что не полное спекание электрода приводит к тому, что часть эмиссионного состава остается в виде порошка. Это приводит к снижению приборов стойкости к воздействию токовых нагрузок, т.е. при воздействии на прибор импульсами тока происходит разрушение электрода и разброс эмиссионного вещества по объему прибора, что приводит к снижению сопротивления изоляции прибора.

Перечисленные технологические проблемы видятся решаемыми. Так, например, использование систем точного дозирования могло бы решить проблему нанесения и дозирования состава на поверхности электрода, а проблемы спекания требуют отдельно дополнительной проработки.

В целом, работа над созданием таких электродов видится перспективной, позволяющей сократить технологический цикл производства разрядников «кнопочной» конструкции, отказаться от использования некоторого оборудования (пресс-автомат, водородные печи), и, как следствие, получить экономический эффект от применения данной технологии.

Библиографический список

1. В.С. Фоменко, И.А. Подчерняева Эмиссионные и адсорбционные свойства веществ и материалов. Справочник. // Атомиздат, Москва 1975

2. Ефимов А.И. и др. Свойства неорганических соединений. Справочник. // Издательство «Химия», Ленинград, 1983

3. Патент России №2206139 с приоритетом от 10.12.2001. Материал для катода// Г.В. Иванченко

УДК 621.315.592

ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ НА ПЛАНАРНОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ

К.В. Бухенский[1], А.Б. Дюбуа[1], С.И. Кучерявый[2], С.Н. Машнина[1], А.С. Сафошкин[1], Е.В. Тишковец[1], А.А. Большакова[1]

[1]Рязанский государственный радиотехнический университет

[2]Обнинский институт атомной энергетики Национального исследовательского ядерного университета МИФИ

e-mail: safoshkin.a.s@rsreu.ru

Аннотация. В работе рассмотрен процесс дифракции ТМ – поляризованной электромагнитной волны гауссова пучка на МДП (металл – диэлектрик – полупроводник) структуре с учетом нелинейности диэлектрической проницаемости полупроводниковой пленки. В рамках теории развит модовый метод расчета процесса взаимодействия излучения со структурой, позволяющий рассчитывать для фиксированного потока энергии возмущения потоки энергий возникающих в процессах дифракции.

Ключевые слова: гетероструктура, модовый метод.

ELECTROMAGNETIC WAVE DIFFRACTION ON PLANAR SEMICONDUCTOR HETEROSTRUCTURES

K.V. Bukhensky[1], A.B. Dubois[1], S.I. Kucheryavyy[2], S.N. Mashnina[1], A.S. Safoshkin[1], E.V. Tishkovets[1], A.A. Bolshakova[1]

[1]Ryazan State Radio Engineering University

[2]Obninsk Institute of Atomic Energy of the National Research Nuclear University MEPhi

e-mail: safoshkin.a.s@rsreu.ru

Abstract: In this paper we consider the process of diffraction of TM - polarized electromagnetic Gaussian beam wave in the MIS structure (metal - insulator - semiconductor), taking into account the nonlinearity of the dielectric permittivity of the semiconductor film. The framework was developed the method of calculation of the mode of interaction of radiation with the structure of the process that allows to calculate for a fixed stream flows of energies resulting in diffraction processes.

Keywords: heterostructure, modal method.

Процессы перераспределения энергии в результате дифракции электромагнитного излучения в диэлектрических средах представляют собой одну из важнейших задач интегральной оптики. По сравнению с процессами распространения электромагнитного излучения вдоль многослойных структур с параллельными (или коаксиальными) границами раздела, которые хорошо изучены и систематизированы к настоящему времени [1,2,8], дифракционные задачи изучены гораздо слабее. Основная проблема заключается в больших математических сложностях, связанных с решением уравнений Максвелла в средах, где границы раздела между средами суть не параллельные плоскости. Условия непрерывности в совокупности с уравнениями Максвелла для таких задач связаны с решением сложных интегродифференциальных уравнений [3], которые имеют аналитическое решение только для определенных геометрий [4]. В работе произведен расчет процесса отражения гауссова пучка с возбуждением поверхностных и объемных электромагнитных полей в структуре, где уже при относительно небольших напряженностях электромагнитного поля нелинейность в диэлектрической проницаемости будет сказываться на процесс отражения от нелинейной структуры. Последний представляет собой четыре области, характеризующиеся диэлектрическими проницаемостями ε_1 - вакуум, $\varepsilon_2(\omega)$ - металл, ε_3 - тонкая полупроводниковая нелинейная пленка, ε_4 - диэлектрик.

Уравнения Максвелла

$$i\omega\mathbf{H} = c\,\mathrm{rot}\,\mathbf{E} \quad \text{и} \quad i\omega\varepsilon_i(\omega)\mathbf{E} = -c\,\mathrm{rot}\,\mathbf{H} \tag{1}$$

в декартовой системе в совокупности с гармоническим характером распространения каждой моды вдоль оси X $\{\mathbf{H}(x,z),\mathbf{E}(x,z)\} = \{\mathbf{H}(z),\mathbf{E}(z)\}\exp(ik_x x)$ связывают компоненты мод ТМ — поляризованного излучения (E_x, E_z, H_y) следующим образом: $\mathcal{E}_x(x,z) = \dfrac{ic}{\omega\varepsilon_i}\dfrac{\partial H_y}{\partial z}$;

$\mathcal{E}_z(x,z)=\frac{ic}{\omega\varepsilon_i}\frac{\partial H_y}{\partial x}$; $E_x(z)=\frac{ic}{\omega\varepsilon_i}\frac{dH_y}{dz}$; $E_z(z)=-\frac{c}{\omega\varepsilon_i}k_xH_y(z)$, что легко получить из (1), учитывая планарность задачи [8]. Огибающие моды H(z), а также волновое число k_x определяются из волнового уравнения и граничных условий. Волновое уравнение вытекает из (1) и дает зависимость поля $H_y(z)$ для каждого из квадрантов:

$$\frac{d^2H_y}{dz^2}+\left[\frac{\omega^2}{c^2}\varepsilon_i-k_x^2\right]H_y=0 \qquad (2)$$

с граничными условиями $H_y(z=-0)=H_y(z=+0)$, $E_x(z=-0)=E_x(z=+0)$, которые полностью определяют структуру каждой моды при x<0 и x>0. Как нетрудно убедиться, решение уравнения (2) при x<0 имеет вид: $H_{1y}(z)=\mathrm{B}_1\exp(i\beta z)+\mathrm{B}_2\exp(-i\beta z)$,

$E_{1z}(z)=-\frac{ck_x^{(1)}}{\omega\varepsilon_1}\left[\mathrm{B}_1\exp(i\beta z)+\mathrm{B}_2\exp(-i\beta z)\right]$, где β — поперечное волновое число, для которого $\beta^2+\left(k_x^{(1)}\right)^2=k_0^2\varepsilon_1$, $k_0=\omega/c=2\pi/\lambda$ – волновое число в вакууме, λ— длина волны падающего излучения.

Два волновых числа β и k_x определяются из одного уравнения. Это означает, что одно из них можно принять независимым. Пусть это будет β. Очевидно, что набор функций (4) будет полным, если мы переберем все возможные β. Видно, что в средах 1 и 3 будет по две гармоники (такое излучение будем называть вырожденным и для определенности обозначим их "+" и "-" гармониками) и соответственно две неопределенные константы для одного значения k_x. Поэтому определение связи между двумя свободными коэффициентами остается произвольным. Этот произвол устраняется наложением на собственные моды условий ортогональности и нормировки:

$$\int_{-\infty}^{\infty}E_{1z}^{\beta^\pm}H_{1z}^{\beta^{\mp'}}dz=0 \text{ и } \int_{-\infty}^{\infty}E_{1z}^{\beta^\pm}H_{1y}^{\beta^{\pm'}}dz=-\frac{c}{\omega}k_x^{(1)}\delta(\beta-\beta'). \qquad (3)$$

Найдем коэффициенты B_1 и B_2. Подставив в условие нормировки значения электрического и магнитного полей, получим: $B_1=B_2^*=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{2\pi}}(1\pm i)$. Таким образом, в среде 1 магнитное поле будет $H_{1y}^{\beta^\pm}(z)=\frac{1}{2}B_{1\beta}\left[(1\mp i)\exp(-i\beta z)+(1\pm i)\exp(i\beta z)\right]$ где $B_{1\beta}=(\varepsilon_1/2\pi)^{1/2}$ — нормировочная постоянная.

Учитывая вышеизложенное, записываем падающее и отраженное излучение в виде

$$\mathcal{H}_{1y}^i(x,z)=\int_0^\infty\left[I_\beta^+H_{1y}^{\beta^+}+I_\beta^-H_{1y}^{\beta^-}\right]\exp\left(ik_x^{(1)}x\right)d\beta \qquad (4.1)$$

$$\mathcal{H}_{1y}^r(x,z)=\int_0^\infty\left[R_\beta^+H_{1y}^{\beta^+}+R_\beta^-H_{1y}^{\beta^-}\right]\exp\left(-ik_x^{(1)}x\right)d\beta \qquad (4.2)$$

где $I_\beta^\pm$ и $R_\beta^\pm$ — амплитуды падающей и отраженной волн. Падающее излучение можно определить из предпоследнего уравнения. Для этого представим магнитное поле как $\mathcal{H}(x,z)=G(z)\exp(-ik_xx)$, где $G(z)=C_0\Big/\left(1+z^2/W_0^2\right)$, а C_0 и W_0 – параметры пучка. С учетом вышесказанного умножим (4.1) сначала на $E_{1z}^{\beta^+}(z)$, затем на $E_{1z}^{\beta^-}(z)$ и по очереди проинтегрируем по z. Принимая во внимание условия ортогональности и нормировки (3), получаем: $\int_{-\infty}^{\infty}G(z)E_{1z}^{\beta^\pm}dz=-\frac{c}{\omega}k_x^{(1)}I_\beta^\pm$.

Полученные результаты должны удовлетворять закону сохранения энергии [5]: $P^i=P^R+P^T+P^{sp}$, где P^i - падающее излучение, P^R - отраженное объемное излучение, P^T - прошедшее излучение и P^{sp} - поток поверхностного поляритона. То есть должно выполняться равенство:

$$\int_0^\infty(2I_\beta I_\beta^*-R_\beta^+R_\beta^{+*}-R_\beta^-R_\beta^{-*})k_x^{(1)}d\beta=TT^*k_s+\int_0^\infty T_\beta T_\beta^*k_x^{(2)}d\beta,$$

которое в совокупности с законом Френеля [6] является критерием истинности полученных результатов. Для удобства целесообразно нормировать полученные величины таким образом, чтобы падающий поток был равен единице, а вектор Пойнтинга был безразмерной величиной [7]. Для этого введем новые «нормированные» параметры гауссова пучка: $C_n = C_0/G$, $W_n = (2\pi/\lambda)W_0$, $k_x^{'} = k_x / k_0$., G — некоторая размерная функция. Тогда для падающего потока $P_x^i = \frac{c^2}{4\pi\omega}\int_0^\infty I_\beta I_\beta^* k_x^{(1)} d\beta = \frac{c}{8\pi}\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_1}} C_0^2 W_0 \frac{\pi}{2} = \left[\frac{cG^2\lambda}{16\pi^2}\right]\left(\frac{\pi C_n^2 W_n}{2\sqrt{\varepsilon_1}}\right)$. В квадратных скобках — размерная величина, в круглых – нет. Первый множитель будет одинаков у всех потоков, поэтому на него можно сократить. Тогда нормированный падающий поток будет равен $P_{x,norm}^i = \frac{\pi C_n^2 W_n}{2\sqrt{\varepsilon_1}} = 1$ при $C_n = \sqrt{\frac{2\sqrt{\varepsilon_1}}{\pi W_n}}$.

Рассмотренные в статье процессы дифракции электромагнитного излучения в пассивной волноведущей среде относятся к той ситуации, когда нелинейные добавки к диэлектрической проницаемости малы настолько, что процессы дифракции практически не зависят от интенсивности полей и их расчет основывается на линейной модели.

Библиографический список

1. Маркузе Д. Оптические волноводы: пер. с англ. / под ред. В.В. Шевченко - М.: Мир, 1974.
2. Нефедов Е.И. Дифракция электромагнитных волн на диэлектрических структурах.- М.: Наука, 1978.
3. Петров Д.В. // Квантовая электроника. 1(2), 329, 1974.
4. Шевченко В.В. Плавные переходы в открытых волноводах. -М.: Наука, 1978.
5. Агранович В.М., Кравцов В.Е., Лескова Т.А.. // ЖЭТФ, 81(11). – С. 1828. 1981.
6. Voronko A.I., Klimova L.G., Shkerdin G.N. // Solid State Comm., 6. P. 361, 1987.
7. Поверхностные поляритоны ./ под ред. В.М. Аграновича, Д. Миллса - М.: Наука, 1986.
8. Дюбуа А.Б., Зилотова М.А., Кучерявый С.И., Сафошкин А.С. – Кинетические процессы в умеренно легированном гетеропереходе. – Вестник РГРТУ. – 2013. – №3(45). – С. 88-92.

УДК 004.2/004.31/538.975/535.3; ГРНТИ 50.09/29.19.22/29.31.27

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛА $GE_2SB_2TE_5$

Н.М. Толкач, Н.В. Вишняков

Рязанский государственный радиотехнический университет,

Россия, Рязань, n.m.tolkach@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются методы построения архитектуры оптических вычислительных устройств на основе материалов, состоящих из халькогенидных стеклообразных полупроводниковых тонкопленочных структур системы соединений Ge2Sb2Te5. Показаны архитектуры матричного зеркального и оптоволоконного коммутаторов.

Ключевые слова: оптическое вычислительное устройство, халькогенидные стеклообразные полупроводники, система соединений Ge2Sb2Te5, архитектура вычислительного устройства, коммутатор.

CONSTRUCTION METHODS OF OPTICAL COMPUTING DEVICES BASED ON MATERIAL $GE_2SB_2TE_5$

N.M. Tolkach, N.V. Vishnakov

Ryazan state radio engineering university,

Russia, Ryazan, n.m.tolkach@gmail.com

Abstract. In the article deals the construction principles of architecture computing devices based on materials consisting of chalcogenide glassy semiconductor thin-film structures of $Ge_2Sb_2Te_5$ system of compounds. The mirror matrix architecture and fiber optic switches architecture are shown.

Keywords: optical computing device, chalcogenide glassy semiconductors, Ge2Sb2Te5 system of compounds, computing device architecture, switch.

1. Введение

Развитие современных вычислительных систем на основе электронных компонентов в ближайшем будущем достигнет предельной черты, дальше которой повышение производительности станет невозможным без увеличения количества элементов и слоев интегральных электрических схем. Перспективной заменой электронных компонентов являются оптические, позволяющие в идеале передавать информацию со скоростью близкой к скорости света.

На данный момент времени среди большинства известных технологий системы оптической обработки и передачи данных построены на базе модуляторов оптического сигнала различных видов, принцип работы которых основан на изменении характеристик светового сигнала в информационном канале [1…4].

Виды модуляторов преимущественно делятся на две категории: к первой относятся те, которые могут изменять собственную прозрачность, в результате изменяя интенсивность проходящих сквозь них оптических лучей; а ко второй те, которые способны менять свои зеркальные свойства, тем самым изменяя интенсивность отраженного света.

Все известные оптические модуляторы контролируются с помощью электронных схем управления, в результате чего их быстродействие ограничено. Этот недостаток практически сводит к минимуму преимущества оптических систем, не позволяя приблизиться к их максимально возможной скорости работы. Поэтому, для того, чтобы резко увеличить скорость в таких системах, необходимы новые технологии оптического управления.

В настоящее время мировым научным сообществом ведутся активные работы по поиску новых материалов для создания полностью оптически-управляемого элемента, позволяющего посредством светового воздействия эффективно управлять световыми сигналами, по аналогии с электронным транзистором. К одному из видов подобных материалов относятся халькогенидные стеклообразные полупроводниковые (ХСП) структуры на основе системы соединений $Ge_2Sb_2Te_5$ (аббревиатура GST) (рисунок 1).

2. Материал GST

Главным свойством, позволяющим применять данный материал в качестве активного элемента, является способность находиться в двух устойчивых фазовых состояниях кристаллической решетки: аморфном и кристаллическом [5]. Изменение фазового состояния можно осуществлять, например, низкоэнергетическими воздействиями светового импульса. Кроме того, материалы на основе GST обладают стабильностью их фазового состояния при комнатной температуре и сверхмалым временем переключения в наноразмерных структурах (2-150 нс) [6, 7]. Структурное отличие аморфной и кристаллической фазы приводит к значительным различиям в оптических свойствах, что можно использовать на практике для бинаризации оптического сигнала.

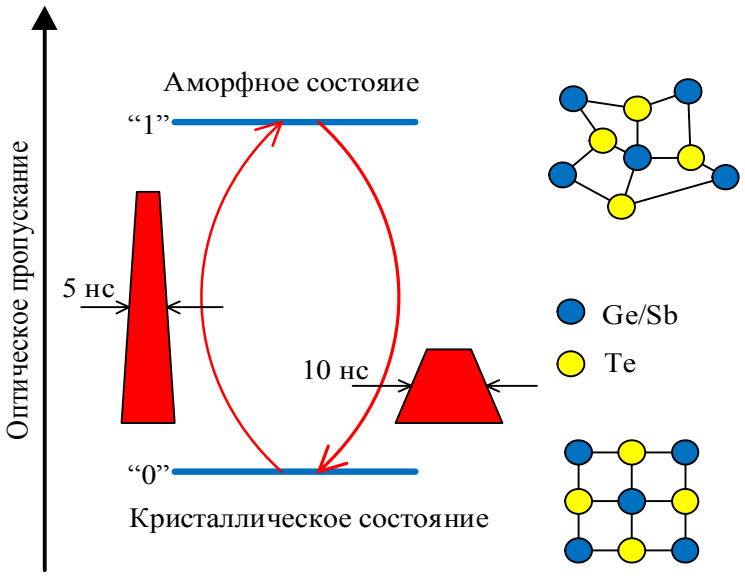


Рис. 1. Иллюстрация свойств GST при изменении фазовой структуры

Создание на основе материалов GST полностью оптического активного элемента открывает широкие возможности применения в вычислительных устройствах. Например, для управления оптическими сигналами нет необходимости в двойном преобразовании сигналов: сначала из оптической формы в электрическую, и затем, после их модификации, вновь в электрическую. Управление сигналами производится сразу на оптическом уровне путем изменения траектории оптических лучей, перенаправляемых с одного оптического элемента на другой.

Во многих работах приводят разные способы реализации простейших оптических вычислительных устройств, выполняющих функцию переключателя, элемента памяти. Наиболее актуальные на основе материалов GST приведены в работах [8 – 10]. В работе [8] продемонстрирован способ коммутации каналов путем вариации направлением распространения отраженного от пленки GST луча. Варьировать направлением хода луча можно благодаря свойству GST материала, связанному с изменением его показателя преломления, в результате смены аморфного фазового состояния на кристаллическое. Также в связи с изменением фазового состояния изменяется коэффициент пропускания пленки, что позволяет использовать слой материла GST, как активный затвор [9, 10].

Для дальнейшей реализации подобных вычислительных устройств и рассмотрения возможности их функционирования необходимо создание общих принципов работы при масштабировании в полноценную вычислительную архитектуру. Поэтому целью данной работы является обозначить эти принципы и разработать архитектуру коммутирующего устройства.

3. Принципы управления оптическими сигналами

Три принципа, на основе которых предполагается осуществлять построение оптических систем управления, основаны на следующих свойствах пленок GST: 1) способность материала менять зеркальные свойства, т.е. отражающую способность, также изменяя интенсивность лучей отраженного света; 2) способность материала менять прозрачность, тем самым изменяя интенсивность проходящих сквозь пленку оптических лучей; 3) способность материала изменять угол рефракции и, таким образом, направление отраженного от пленки луча.

4. Архитектура зеркального матричного коммутатора 5x16

На рисунке 2 показан пример архитектуры матричного коммутатора 5x16, имеющего 4 управляющих входа – S0-S3, один информационный вход – I0 и 16 выходов 0001-1111. Принцип работы основан на том, что световым импульсом с соответствующих управляющих входов осуществляется контроль состояния зеркал, покрытых тонкой пленкой из материала GST. При подаче управляющих импульсов определенной формы пленка изменяет свое состояние и либо пропускает, либо отражает падающий на зеркало информационный сигнал со входа I0. В данной схеме принимаем за уровни логического «нуля» – режим пропускания зеркалом светового пучка и логической «единицы» – режим отражения. Информационный сигнал имеет отличную от управляющего длину волны излучения, таким образом, их можно отделить друг от друга, при этом интенсивность информационного сигнала гораздо меньше управляющего, это необходимо, чтобы не вызвать изменений фазового состояния пленки.

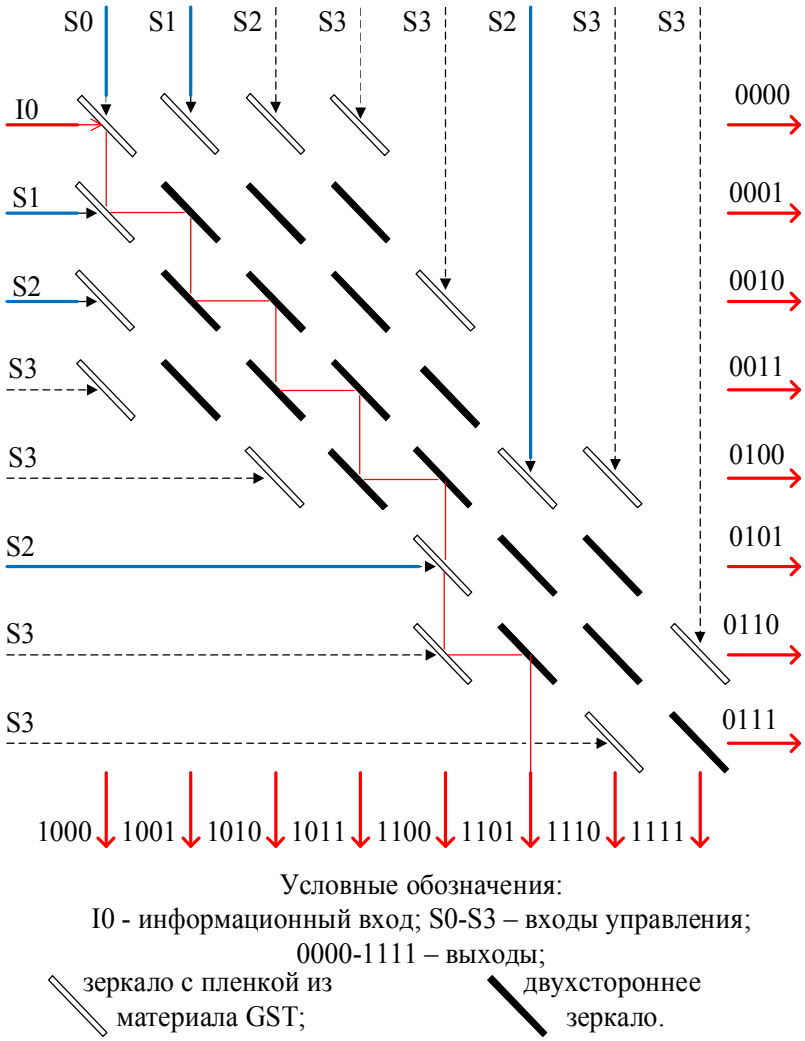
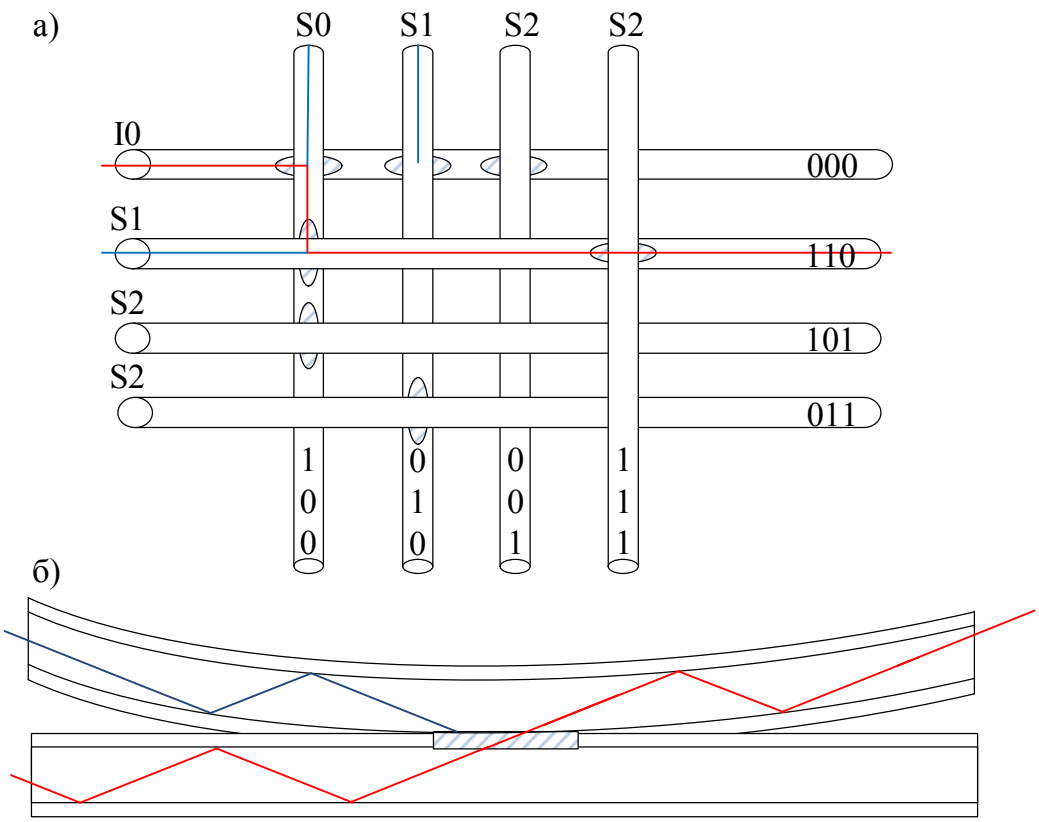


Рис. 2. Архитектура зеркального матричного коммутатора 5x16

5. Архитектура оптоволоконного коммутатора 4x8

На рисунке 3, а показан пример архитектуры оптоволоконного коммутатора 4x8, имеющего 3 управляющих входа – S0-S2, один информационный вход – I0 и 8 выходов 001-111. Рисунок 2, б демонстрирует общий принцип передачи оптического сигнала в месте контакта двух оптоволоконных линий. В месте контакта расположена пленка GST, при прохождении управляющего светового импульса через которую, изменяются отражающие и пропускающие свойства материала пленки. Таким образом, при подаче соответствующего оптического импульса по верхнему оптоволокну пленка меняет свое состояние и либо пропускает и направляет распространение информационного сигнала по верхнему оптоволокну, либо отражает сигнал и направляет его распространение дальше по нижнему оптоволокну. Например, как видно на рисунке 3, а, при подаче на входы S0, S1 оптического импульса сигнал со входа I0 перенаправляется на выход 110.



Условные обозначения:
I0 - информационный вход; S0-S2 – входы управления;
000-111 – выходы;

- область контакта из пленки GST;
- траектория информационного луча;
- траектория управляющего луча.

Рис. 3. Архитектура оптоволоконного коммутатора 4x8: а) оптоволоконное построение; б) передача оптического сигнала в месте контакта двух оптоволоконных линий

Заключение

Таким образом, в данной работе обозначены основные принципы построения полностью оптических вычислительных устройств на основе материалов, состоящих из халькогенидных стеклообразных полупроводниковых тонкопленочных структур системы соединений $Ge_2Sb_2Te_5$, на примере коммутаторов переключения сигнала с одного входа на один из выходов. Разработаны и продемонстрированы схемы построения архитектуры коммутаторов для системы зеркальных элементов и оптоволоконной системы. Данные конфигурации устройств вполне пригодны для выполнения простейших вычислительных операций, что в совокупности с преимуществами от их полностью оптического построения, позволит обрабатывать информацию со скоростями близкими к световым.

Библиографический список

1. Маккавеев В. Фотонные коммутаторы // Компоненты и технологии. – 2006. – №2.
2. Low-Voltage, Large-Scan Angle MEMS Analog Micromirror Arrays With Hidden Vertical Comb-Drive Actuators / Hah D., Ting-Yu H. S, and others. // Journal of microelectromechanical systems. Vol. 13, No. 2, April, 2004.
3. Султанов А. Х., Виноградова И. Л. Подход к построению коммутаторов оптических сигналов, управляемых оптическим излучением // Компьютерная оптика. – 2004. – № 26. – С. 56-64.
4. Гайворонская Г. С., Рябцов А. В. Новый подход к построению коммутаторов оптических сигналов // Киев: Вестник ДУИКТ. – 2012. – Т. 10. – № 3. – С. 43-46.
5. Sergey Kozyukhin, Vera Kudoyarova, Huy Phuc Nguyen, Alexander Smirnov and Viktor Lebedev. Influence of doping on the structure and optical characteristics of Ge2Sb2Te5 amorphous films // Physica Status Solidi C. – 2011. – Vol. 8. – No. 9. – Pp. 2688-2691. doi:10.1002/pssc.201084060.

6. Yamada, N. Rapid phase transitions of GeTe-Sb2Te3 pseudobinary amorphous thin films for an optical disk memory / N. Yamada, E. Ohno, K. Nishiuchi, et al. // J. Appl. Phys. – 1991. – Vol. 69. – P. 2849.
7. Meinders, E. R. Optical Data Storage Phase-Change Media and Recording / E. R. Meinders, A. V. Mijiritskii, L. van Pieterson et al. // Philips Research Book Series. V.4. Berlin. Springer-Verlag. 2006.
8. Zou L., Cryan M., Klemm M. Phase change material based tunable reflectarray for free-space optical inter/intra chip interconnects // Optics Express. – 2014. – Vol. 22. – Issue 20. – PP. 24142-24148. Doi: 10.1364/OE.22.024142.
9. Ríos C., Stegmaier M., Hosseini P., Wang D., Scherer T., Wright C.D., Bhaskaran H., Pernice W. Integrated all-photonic non-volatile multi-level memory // Nature Photonics. – 2015. – V. 9. – PP 725–732. Doi:10.1038/nphoton.2015.182.
10. Gholipour B., Zhang J., MacDonald K.F., Hewak D.W., Zheludev N.I. An All-Optical, Non-volatile, Bidirectional, Phase-Change Meta-Switch // Advanced materials. – 2013. – Vol. 25. – Issue 22. – PP 3050–3054. Doi: 10.1002/adma.201300588.

УДК 544.654.2; ГРНТИ 31.15.33

ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ СПЛАВА НИКЕЛЬ-МОЛИБДЕН ИЗ АММИАЧНО-ЦИТРАТНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА В РЕЖИМЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Д.В. Суворов, Ю.М. Стрючкова, Г.П. Гололобов, М.А. Серпова, Н.Б. Рыбин
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, kmaria023@yandex.ru

Аннотация. В данной работе методом нестационарного электролиза исследованы способы нанесения электролитического сплава никель-молибден на никелевую подложку в диапазоне изменения плотности тока от 2 до 9 А/дм2. Получены СЭМ-изображения поверхностей нанесённых покрытий. Методом рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии определено, что никель и молибден в полученных осадках соотносятся примерно как 3 : 1 соответственно. Обнаружено, что при нестационарном импульсном режиме электролиза, с шагом импульса, соответствующему сотым долям секунды, из аммиачно-цитратного электролита получаются наиболее плотные и гладкие осадки электролитического сплава никель-молибден.

Ключевые слова: электролитический сплав никель-молибден, переменный ток, электролиз

ELECTRODEPOSITION OF ALLOYS NICKEL-MOLYBDENUM AMMONIUM CITRATE ELECTROLYTE IN THE MODE OF ALTERNATING CURRENT

D.V. Suvorov, Yu.M. Stryuchkova, G.P. Gololobov, M.A. Serpova, N.B. Rybin
Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, Russia, kmaria023@yandex.ru

Abstract. In this paper the method of non-stationary electrolysis investigated methods for applying electrolytic nickel-molybdenum alloy on a nickel substrate in the range-change of the current density of 2 to 9 A / dm 2. Obtained SEM image suffered surface-coverings. The x-ray energy dispersive spectroscopy determined that the nickel and molybdenum in the obtained precipitation correspond approximately 3: 1, respectively tively. It was found that under unsteady pulsed electrolysis mode with pulse step corresponding to hundredths of a second, of the ammonia-citrate electrolyte obtained the most dense and smooth precipitation of electrolytic nickel-molybdenum alloy.

Keywords: electrolytic nickel-molybdenum alloy, alternating current, electrolysis

1. Введение

Электролитический сплав никель-молибден находит широкое применение в науке и технике благодаря ряду ценных свойств. Из-за мелкодисперсной структуры, приближающейся к аморфной, эрозионной стойкости, высокой механической прочности и износоустойчивости, жаростойкости и жаропрочности этот сплав используют, например, в конструкциях контактных покрытий герконов [1], в управляемых ускорителем ядерных реакторах. Известны его каталитические свойства по отношению к реакции выделения водорода в кислых средах [2].

В настоящее время наиболее доступным способом получения покрытий сплавом никель-молибден является метод его электрохимического осаждения из растворов, содержащих соли никеля и молибдена. Этот метод не требует больших энергетических затрат или специального сложного оборудования.

Характеристики электролитического сплава зависят от состава электролита и режима электролиза. Преимущества электроосаждения покрытий в режиме нестационарного электролиза давно известны и описаны во многих источниках, например в [3]. Покрытия, осаж-

даемые в таком режиме, отличаются высокой чистотой, кроме того, варьирование электрических параметров позволяет управлять их структурой. В данной работе осаждение сплава никель-молибден проводили в режиме переменного импульсного тока из традиционного аммиачно-цитратного электролита, компоненты которого не являются дорогостоящими или дефицитными.

2. Методика эксперимента

Покрытие осаждали на образцы из никеля марки НПА1. Перед каждым опытом образцы полировали алмазной пастой НОМ 0,5/0 до появления зеркального блеска поверхности. После полировки никель обрабатывали ультразвуком в 5 М растворе HCl в течение 20 мин. В дальнейшем образцы в течение 30 минут промывали в ацетоне, а затем в спирте в течение того же количества времени, на заключительной стадии их промывали дистиллированной водой. Перед тем, как наносить электрохимическое покрытие сплавом никель-молибден, поверхность активировали катодно в растворе, содержащем хлорид никеля и соляную кислоту в соотношении 1:1, в течении 3 мин., при плотности тока 1 А/дм^2. Электролитическое осаждение сплава никель-молибден проводили при действии переменного импульсного тока из аммиачно-цитратного электролита, состав которого описан в [4]. Для осаждения покрытия использовали двухэлектродную ячейку с нерастворимым платиновым анодом и никелевым катодом. С целью определения области плотностей токов, при которых целесообразно наносить электрохимическое покрытие сплавом никель-молибден на никелевую подложку, были сняты потенциодинамические поляризационные кривые. Для поляризации никелевого электрода использовали трёхэлектродную ячейку с хлорсеребряным электродом сравнения и платиновым противоэлектродом. В работе использовали потенциостат IPC-Pro.3A. Все потенциалы приведены относительно стандартного водородного электрода.

3. Результаты и обсуждение

На рисунке 1 показаны потенциодинамические поляризационные кривые, снятые со скоростью развертки потенциала образца ±10 мВ/с, при комнатной температуре в растворе аммиачно-цитратного электролита, из которого в последствие проводили электроосаждение сплава никель-молибден.

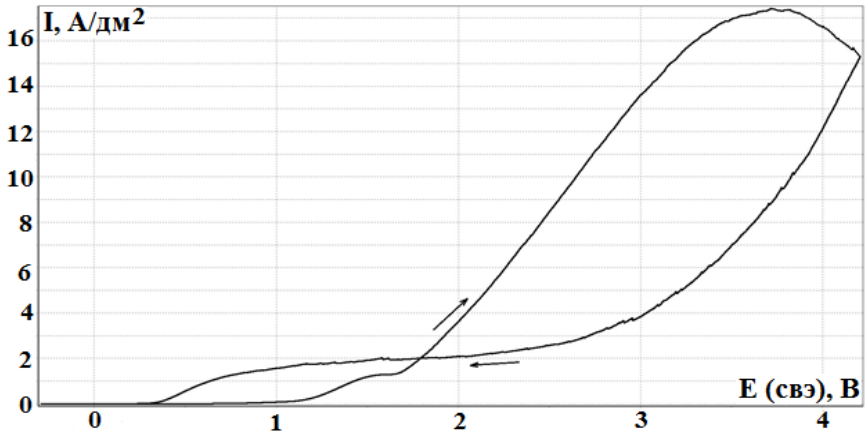


Рис. 1. Потенциодинамические поляризационные кривые никеля марки НПА1 в аммиачно-цитратном электролите, скорость развертки потенциала ±10 мВ/с

Циклическую поляризацию проводили многократными проходами в направлении от катодного к анодному потенциалам и обратно. Изучен широкий интервал потенциалов преимущественно в анодной области. На поляризационных кривых прямого и обратного тока наблюдается существенный гистерезис, отражающий изменения состояния поверхности образца в результате его растворения и последующего восстановления. Активное растворение поверхности начинается примерно при 1,7 В на прямом ходе. На обратном ходе интенсивные окислительные процессы прекращаются примерно при 2,5 В, и до 0,7 В наблюдается относительно спокойный участок, на котором значения тока мало зависят от потенциала образца. Видимо, это связано с адсорбцией на поверхности никеля его солей в этой области потенциалов. При дальнейшем смещении потенциала в катодном направлении снова выявляется

зависимость скорости растворения от потенциала. Растворение поверхности никеля прекращается примерно при 0,5 В. На поляризационной кривой прямого хода имеется отчётливо видная площадка предельного тока (примерно в области 1,4 – 1,6 В). Осаждение компактных осадков сплава никель-молибден из аммиачно-цитратного электролита в гальваностатическом режиме начинается при плотностях тока, которые соответствуют этой площадке, зарегистрированной на поляризационной кривой, и продолжается при более высоких плотностях тока.

Однако при существенном увеличением плотности тока осаждаемый сплав становится более рыхлым и качество осадка ухудшается. Это связано с наличием диффузионных ограничений по никелю и молибдену при высоких плотностях тока. На рисунке 2 показаны СЭМ-изображения поверхности сплава никель-молибден, который был осаждён в гальваностатическом режиме на никелевую подложку при плотности тока 44 А/дм^2, время осаждения 10 мин. Видно, что покрытие очень пористое, имеет трещины и буквально отслаивается от поверхности.

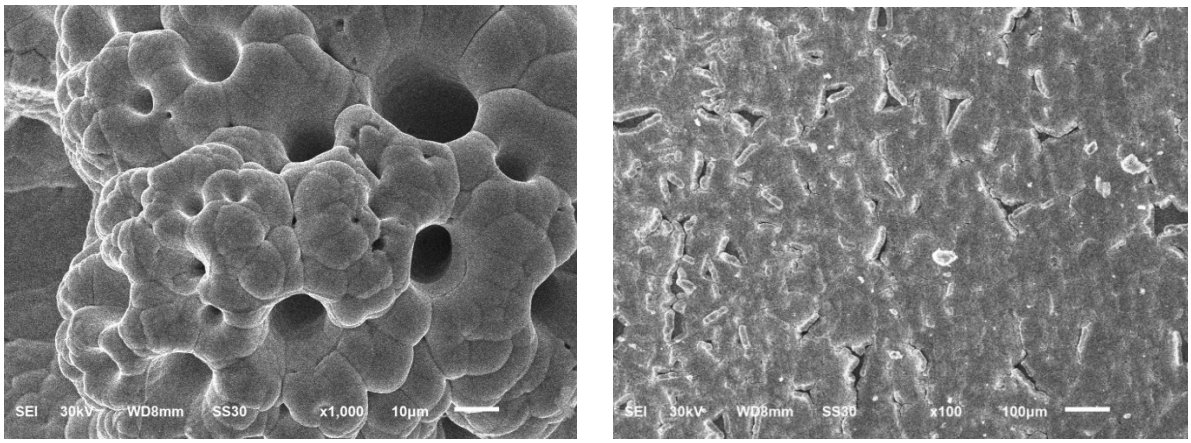


Рис. 2. СЭМ-изображения поверхности сплава никель-молибден, осажденного на никель, при различном увеличении. Время осаждения 10 мин

В виду всего выше сказанного в данной работе было решено провести серии экспериментов в режиме нестационарного электролиза с различными вариантами длительности импульсов в диапазоне плотностей тока от 2 до 9 А/дм^2. На рисунке 3 показаны СЭМ-изображения поверхностей покрытий, осаждённых при плотности тока 5 А/дм^2 в режиме постоянного тока (рис. 3а) и в режиме переменного импульсного тока с различной длиной импульса (рис. 3б, в, г, д). Время осаждения во всех случаях составило 10 минут. Видно, что при переходе от режима постоянного тока к режиму переменного импульсного тока и при уменьшении длительности импульса на порядок рельеф покрытия становится менее развитым, осаждаемые осадки получаются более плотными. Поверхность сплава никель-молибден, осаждённого при постоянном токе, имеет довольно живописный рельеф со значительным перепадом высот (рис. 3а). По сравнению с ней поверхность сплава, осаждённого в импульсном режиме с величиной импульса, соответствующего десятым долям секунды, выглядит более плотной, но развитость рельефа всё же имеется (рис. 3б). Поверхность осадков, которые были получены при длительности шагов импульса, соответствующим сотым долям секунды (рис. 3в, г, д), выглядит наиболее предпочтительно: рельеф более сглаженный, перепад высот незначительный; если сравнивать эти три изображения между собой, то существенной разницы между ними не наблюдается.

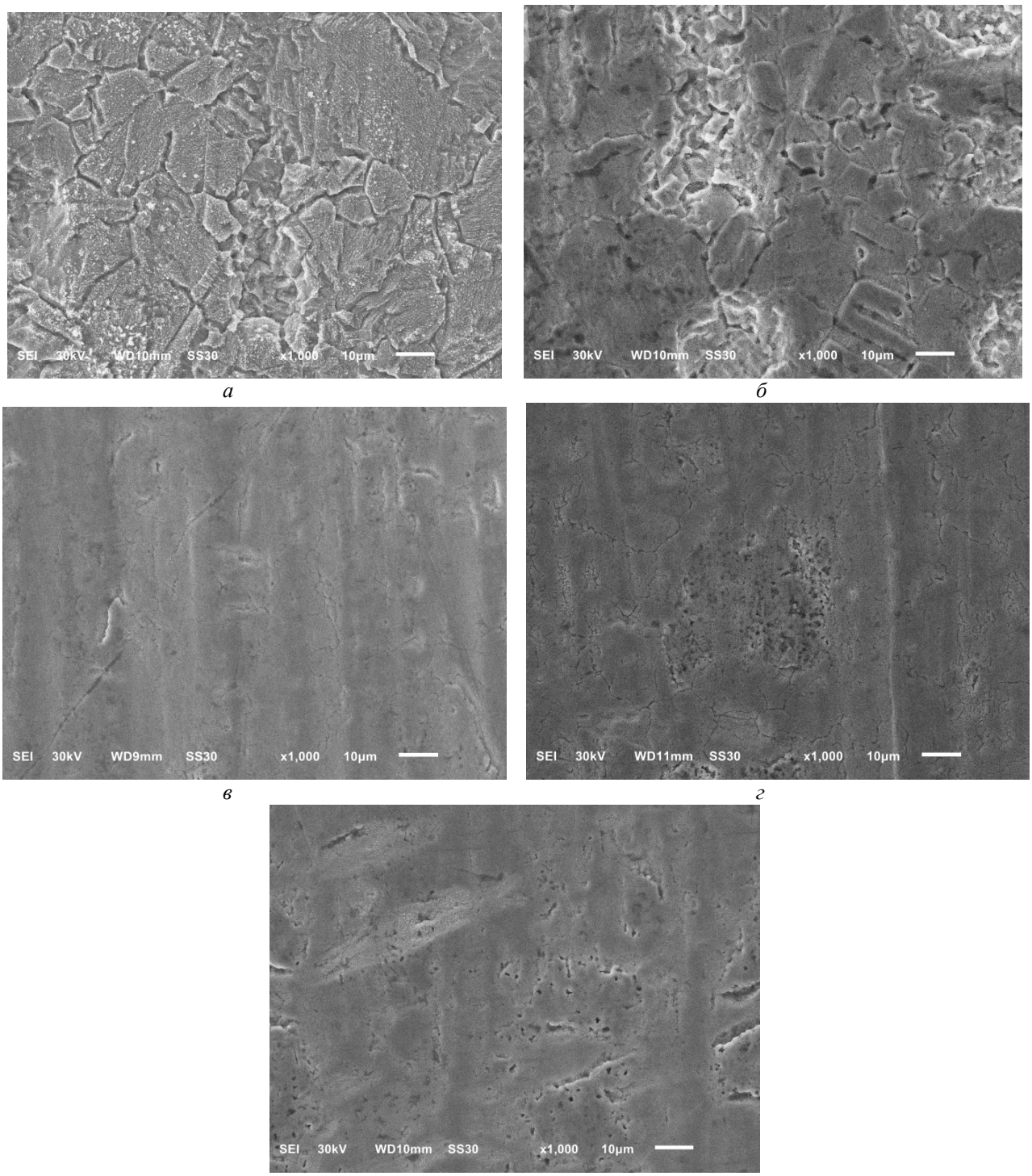
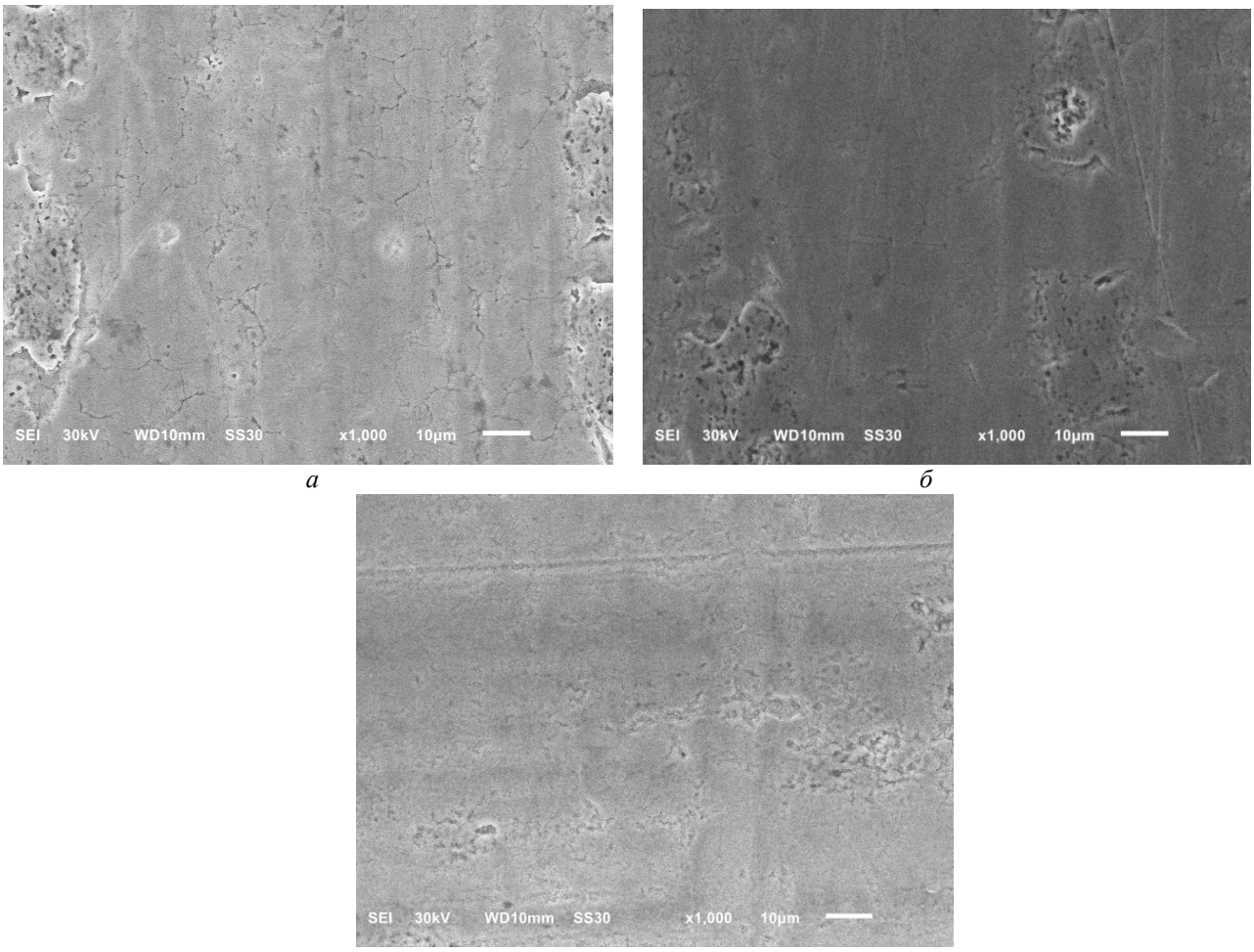


Рис. 3. СЭМ-изображения поверхности сплава никель-молибден, осажденного на никель. Время осаждения 10 мин: *а* – режим постоянного тока, плотность тока 5 А/дм^2; *б*, *в*, *г*, *д* – режим переменного импульсного тока; *б* – шаг импульса: 5 А/дм^2- 0,5 с, -0,2 А/дм^2- 0,2 с; *в* – шаг импульса: 5 А/дм^2- 0,05 с, -0,2 А/дм^2- 0,01 с; *г* – шаг импульса: 5 А/дм^2- 0,05 с, -0,2 А/дм^2- 0,02 с; *д* – шаг импульса: 5 А/дм^2- 0,05 с, -0,2 А/дм^2- 0,03 с.

Анализ осадков сплава никель-молибден, полученных в режиме переменного импульсного тока с длительностью шага импульса, соответствующего сотым долям секунды, в диапазоне плотностей токов от 2 до 9 А/дм^2, показал, что в этом диапазоне величина тока не влияет на качество осадка. На рисунке 4 приведены СЭМ-изображения сплава никель-молибден, осажденного в импульсном режиме электролиза с длительностью шагов импульса, соответствующей сотым долям секунды при максимальной плотности тока 2 А/дм^2 (рис. 4а), 4 А/дм^2 (рис. 4б) и 9 А/дм^2 (рис. 4в). Поверхности сплава на рисунке 4 довольно плот-

ные, имеют небольшие шероховатости. Тенденция в изменении качества поверхности при изменении величины плотности тока не видна.



а *б* *в*

Рис. 4. СЭМ-изображения поверхности сплава никель-молибден, осажденного на никель в режиме переменного импульсного тока. Время осаждения 10 мин: *а* – шаг имульса: 2 А/дм^2- 0,05 с, -0,2 А/дм^2- 0,02 с; *б* – шаг имульса: 4 А/дм^2- 0,05 с, -0,2 А/дм^2- 0,02 с; *в* – шаг имульса: 9 А/дм^2- 0,05 с, -0,2 А/дм^2- 0,02 с.

Методом рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии было определено процентное соотношение никеля и молибдена в осадках. Содержание молибдена – 21-24 вес. %, никеля – 79-76 вес. %. Зависимость процентного содержания компонентов сплава от режима электролиза не выявлена

Выводы

Таким образом, в результате данной работы установлено, что наиболее плотные и гладкие осадки электролитического сплава никель-молибден из аммиачно-цитратного электролита получаются при нестационарном импульсном режиме электролиза, с шагом импульса, соответствующему сотым долям секунды. Осаждение сплава в таком режиме возможно во всём исследованном диапазоне плотностей токов, от 2 до 9 А/дм^2. При этом режим осаждения не влияет на процентное содержание компонентов в осадке.

Библиографический список

1. Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе / С. М. Карабанов, Р. М. Майзельс, В. Н. Шоффа ; под ред. В. Н. Шоффы. - Долгопрудный: Интеллект, 2011. - 407 с.
2. Lewandowski M., Sarbak Z. Hydrofining activity and acid-base properties of nickel-molybdenum catalysts incorporated on sodium and magnesium ions-modified alumina // Applied Catalysis A: General. 1998. Т. 168. № 1. С. 179-185.
3. Коробочкин В.В., Ханова Е.А., Жданова Н.В. Характеристика пористой структуры оксидов, полученных электрохимическим синтезом с помощью переменного тока // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 4. – С. 55-56.
4. Васько А.Т. Электрохимия молибдена и вольфрама. – Киев: Наукова думка, 1977. – С. 120.

УДК 544.057; ГРНТИ 31.15.33

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СПЛАВА НИКЕЛЬ-ВОЛЬФРАМ

Д.В. Суворов, Г.П. Гололобов, М.А. Серпова, Ю.М. Стрючкова, Д.В. Будников
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, kmaria023@yandex.ru

Аннотация. В данной работе представлены результаты электрохимического синтеза сплава NiW, получаемые при гальваностатическом и гальванодинамическом режимах . С помощью СЭМ-изображений поверхности полученных покрытий изучен его рельеф, выполнена оценка клиновидных дефектов. Обнаружено, что электрохимическое осаждение NiW в гальванодинамическом режиме позволяет получать более однородные покрытия без существенной потери в толщине пленки, а также исключает возникновение клиновидных дефектов, что делает этот способ более предпочтительным с точки зрения качества покрытия.

Ключевые слова: синтез сплава никель-вольфрам, электролиз, гальваностатический режим, гальванодинамический режим

PECULIARITIES OF ELECTROCHEMICAL SYNTHESIS ALLOY NICKEL-TUNGSTEN

D.V. Suvorov, G.P. Gololobov, M.A. Serpova, Yu.M. Stryuchkova, D.V. Budnikov
Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, Russia, kmaria023@yandex.ru

Abstract. This paper presents the results of electrochemical synthesis NiW alloy semi-tea at galvanostatic and galvanodinamicheskom modes. With the help of SEM images obtained by coating the surface to study its topography, the estimation of wedge-shaped defects. It was found that the electrochemical deposition NiW galvanodi-in dynamic mode allows to obtain more uniform coating without substantial losses in the thickness of the film, and also eliminates the occurrence of wedge-shaped defects that the de-barking, this method is more preferable in terms of the quality of the coating.

Keywords: synthesis of nickel-tungsten, electrolysis, galvanostatic mode galvanodina-nomic mode

1. Введение

В последние годы возрос интерес к электролитическому осаждению никель-вольфрамовых сплавов (NiW), что обусловлено их уникальной комбинацией трибологических, магнетических, электрических и электроэрозионных свойств. Эти сплавы проявляют хорошие механические свойства (например высокий предел прочности на разрыв и отличную твердость, а также превосходную износоустойчивость), хорошую устойчивость к окисляющему воздействию кислот, а также высокую температуру плавления [1].

К нынешним и перспективным применениям сплавов Ni-W относится изготовление запирающих слоев или ограничивающих слоев при нанесении медных покрытий для использования в сверхбольших интегральных схемах или в микроэлектромеханических системах (МЭМС), изготовление штампов, магнитных головок и реле, опор, резисторов, электродов для ускорения реакции выделения водорода в щелочной среде, а также экологически чистая замена твердым хромовым покрытиям в аэрокосмической отрасли, и многое другое [2-3].

Работы по определению оптимальных условий для электролитического осаждения покрытий из сплава никель-вольфрам с требуемыми функциональными свойствами ведутся по всему миру и продолжаются до сих пор [4], что и обуславливает актуальность данной работы. Поэтому целью изучения электрохимического синтеза сплава никель-вольфрам является разработка условий получения наиболее однородного покрытия сплава NiW с минимальным количеством трещин, малым уровнем шероховатости и удовлетворительными физическими свойствами для последующего применения в качестве жаропрочного и износостойкого материала покрытия электрических контактов.

2. Методика эксперимента

Эксперименты по электроосаждению покрытий из сплава никель-вольфрам (NiW) проводились в лаборатории на закрытом стенде с использованием потенциостата IPC-Pro 3A. Синтез проводился при различных режимах по току (гальваностатический и гальванодинамический). В пределах одного режима по току изменялась либо плотность тока (для постоянного тока), либо форма импульса (для импульсного тока). Время осаждения было одина-

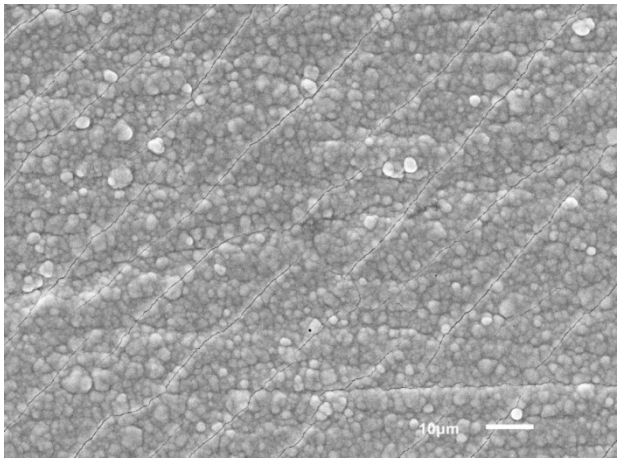
ковым для всех экспериментов и составляло 10 минут. Температура электролита поддерживалась равной 40 ºС (за исключением одного эксперимента, где она была повышена до 60 ºС). При осаждении сплавов использовался электролит следующего состава:

- сульфат никеля $NiSO_4$ – 30 г/л
- пирофосфат калия $K_4O_7P_2$ – 200 г/л
- вольфрамат натрия Na_2WO_4 – 30 г/л

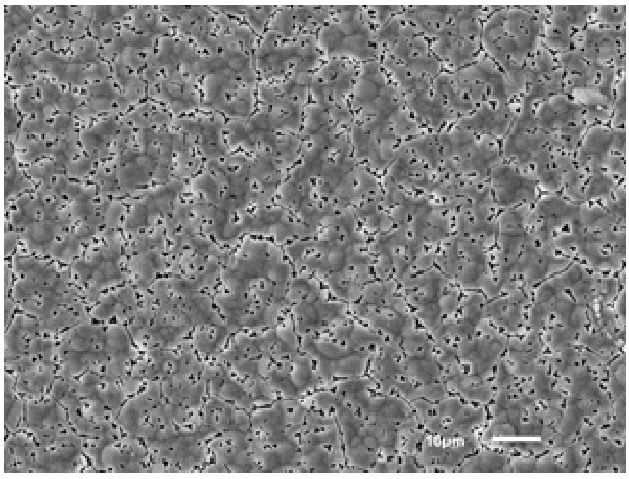
3. Результаты и обсуждение

Осаждение в гальваностатическом режиме.

При данном режиме осаждения изменялась плотность тока. На представленных ниже снимках можно видеть, что при наименьшей плотности тока – 4 А/дм^2 – поверхность покрытия неровная и состоит из сферических образований – глобул – диаметром порядка единиц микрометров, которые, впрочем, распределены достаточно равномерно (рис. 1а). Покрытие при этом не имеет широких глубоких трещин и на вид выглядит достаточно однородным, хотя и неровным.



а



б

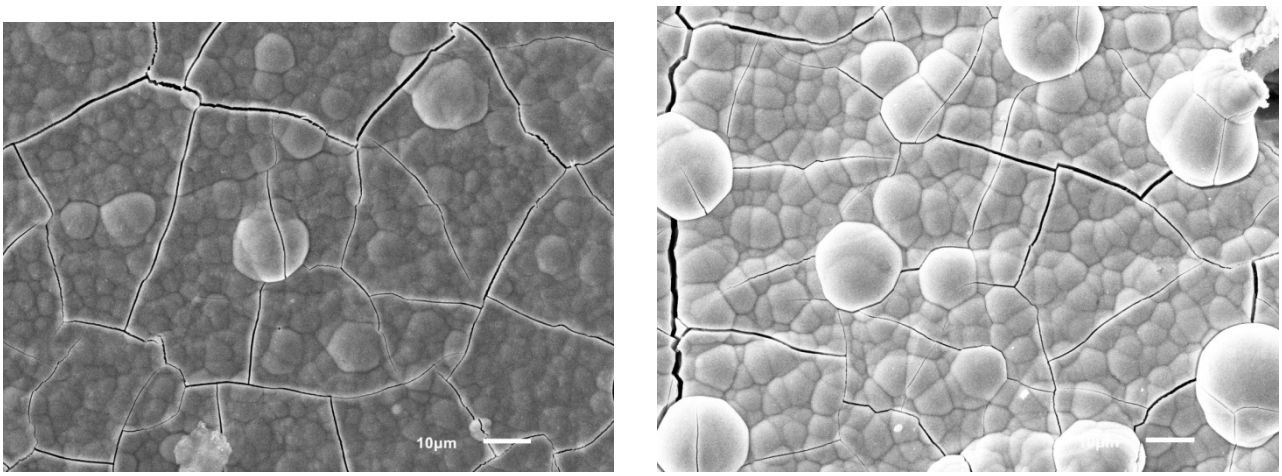
Рис. 1. СЭМ-изображение поверхности покрытия из сплава NiW а) при плотности тока 4 А/дм^2, б) при плотности тока 6 А/дм^2

При увеличении плотности тока размер глобул увеличивается, а их количество уменьшается, при этом на поверхности покрытия появляется сеть глубоких трещин (рис. 1б). Средние значения размеров глобул и трещин, а также толщины пленки были измерены для каждого значения плотности тока и представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Морфологические свойства покрытий, полученных в режиме постоянного тока при различных плотностях тока

Плотность тока, А/дм^2	4	6	8	12	14	15	20
Средняя толщина покрытия, мкм	2	7	14.2	20	33	23.6	53
Средняя ширина трещин, мкм	0.134	0.2	0.6	0.61	0.67	0.64	0.25
Средний диаметр глобул, мкм	2.3	3.4	6.1	6.6	9.7	6.5	22
Выход по току, %	5,6	13,1	19,9	18,7	26,5	17,7	26,8
Наличие клиновидных дефектов	нет	да	нет	нет	нет	да	да

Причина появления этих дефектов до сих пор не изучена, но было замечено, что количество их уменьшается при дальнейшем увеличении плотности тока. Удивительно, но дефекты отсутствовали уже при 8 А/дм^2 (рис. 2а), также не возникая при 14 А/дм^2 (рис. 2б). При 15 А/дм^2 поверхность, вопреки ожиданиям, выглядит более однородной, нежели при меньших значениях плотности тока, и глобулы выражены не так отчетливо, хотя еще при 14 А/дм^2 их можно было отчетливо увидеть.



а *б*

Рис. 2. СЭМ-изображение поверхности покрытия из сплава NiW, а) полученного при плотности тока 8 А/дм^2, б) полученного при плотности тока 14 А/дм^2

Проведенные позже эксперименты по осаждению сплава в различных режимах по току продемонстрировали дальнейшее увеличение глобул с ростом плотности тока. Глобулы наибольшего размера наблюдались на поверхности образца покрытия, осажденного с использованием плотности тока 20 А/дм^2, причем здесь же были обнаружены еще и клиновидные дефекты, хотя и в гораздо меньшем количестве (рис. 3). Что интересно, дефекты в этом случае распределены неравномерно и локализованы на поверхности небольших глобул, как правило зажатых между более крупными, на поверхности которых, напротив, дефектов нет. Это может говорить о том, что внутренние напряжения в покрытии оказывают влияние на появление этих дефектов.

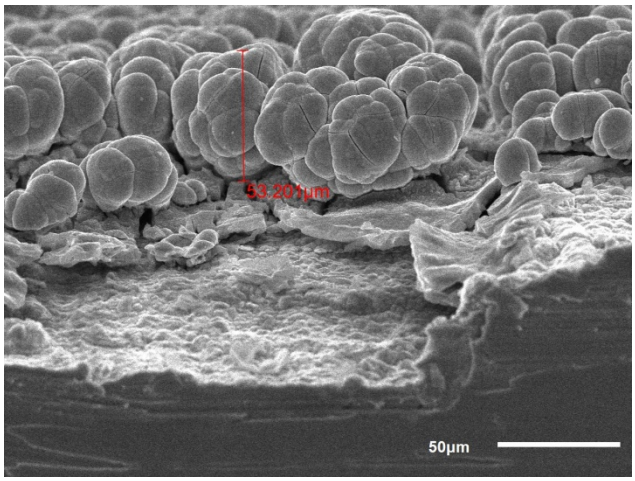


Рис. 3. СЭМ-изображение поперечного сечения покрытия NiW, полученного при плотности тока 20 А/дм^2

Изменение плотности тока приводит не только к появлению или исчезновению клиновидных дефектов, но и к изменению толщины и структуры пленки, а также степени и характера ее растресканности. С увеличением плотности тока ширина трещин увеличивалась, а общая доля занимаемой ими площади уменьшалась, покрытие при этом «разбивалось» ими на более крупные фрагменты. Толщина пленки увеличивалась с увеличением плотности тока; так, при 4 А/дм^2 покрытие имело толщину порядка 2 мкм, а при 14 А/дм^2 – уже порядка 30 мкм, хотя из-за неоднородной структуры покрытия говорить в этом случае приходится о средней толщине – покрытие состояло из крупных глобул.

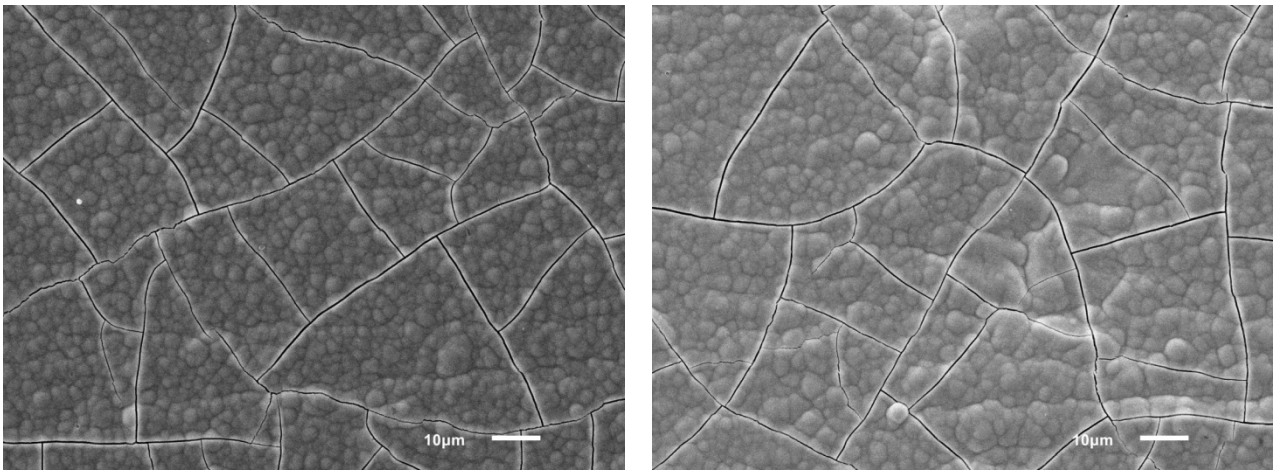
Осаждение в гальванодинамическом режиме.

Результаты экспериментов по осаждению в импульсном режиме представлены на рисунке 4. Длительность осаждения составляла 10 минут, состав электролита не изменился, менялись лишь параметры импульса: в одном случае их период составлял 0.7 с, в другом – 0.07 с. Длительности включенного/выключенного состояния составляли 0.5/0.2 и 0.05/0.02 с.

соответственно. Помимо этого было проведено осаждение в условиях линейно нарастающей плотности тока, 1-15 А/дм^2 на протяжении всего времени осаждения (10 мин), СЭМ-изображение полученного покрытия приведено на рисунке 5. Результаты изучения морфологии полученных покрытий приведены в таблице 2. Можно заметить, что в импульсном режиме не происходит образования клиновидных дефектов, наблюдаемых в покрытиях, полученных с использованием постоянного тока той же плотности.

Таблица 2 - Морфологические свойства покрытий, полученных в режиме импульсного тока при различных временных параметрах импульса и постоянных прочих условиях

Плотность тока, А/дм^2 и параметры импульса	+8А 0.5 с -0.2А 0.2 с	+8А 0.05 с - 0.2А 0.02 с	1-15 А, линейное нарастание на протяжении 10 мин.
Средняя толщина покрытия, мкм	10	11	9.8
Средняя ширина трещин, мкм	0.43	0.38	0.85
Средний диаметр глобул, мкм	3.2	4.2	4.5
Наличие клиновидных дефектов	нет	нет	нет



а *б*

Рис. 4. СЭМ-изображение поверхности покрытия из сплава NiW, полученного в импульсном режиме при плотности тока 8 А/дм^2 а) (0.5 с) и -0.2 А/дм^2 (0.2 с), б) (0.05 с) и -0.2 А/дм^2 (0.02 с)

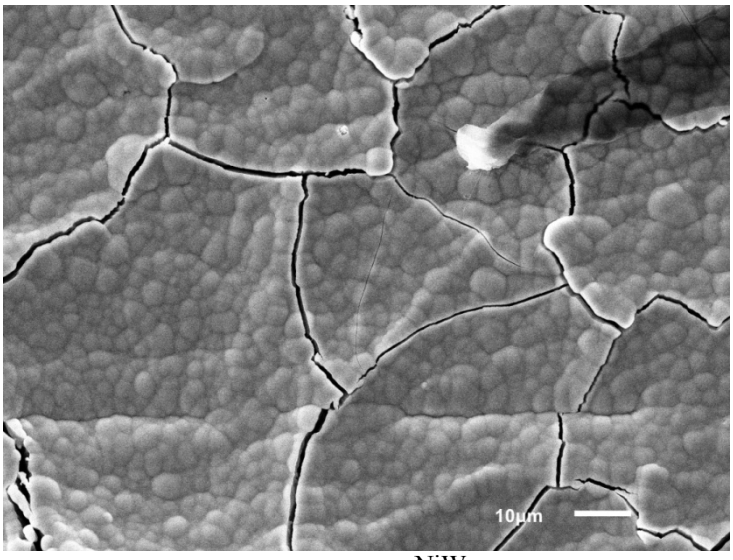


Рис. 5. СЭМ-изображение поверхности покрытия из сплава NiW, полученного в режиме линейного нарастания плотности тока от 1 до 15 А/дм^2 на протяжении 10 минут

Из приведенных изображений видно, что образцы, полученные при различных длительностях прямоугольного импульса, друг от друга отличаются мало, хотя поверхность образца соответствующего периоду импульса 0.7 с. выглядит более однородно. По сравнению с образцами, полученными с использованием постоянного тока той же плотности 8 А/дм^2 (рис. 4.10) оба образца имеют более однородную структуру поверхности, средний размер глобул при этом меньше (3.2-4.2 против 6.1), а распределение глобул по размерам более равномерное: в случае образца, полученного при использовании постоянного тока, на поверхности встречаются немногочисленные глобулы диаметром в 2.5-3 раза больше среднего, в то время как поверхности двух рассматриваемых образцов подобных больших одиночных глобул не имеют. Толщина покрытия при этом, однако, тоже меньше – около 10 мкм против 14 мкм для постоянного тока. Но меньше и средняя ширина трещин.

Образец, полученный в режиме линейного нарастания плотности тока (рис. 8) по толщине покрытия и среднему диаметру глобул не отличается значительно от образцов, полученных в импульсном режиме. Однако, важным отличием является гораздо более растресканная поверхность; при этом средняя ширина трещин больше почти в два раза, а само покрытие разбито на участки, края которых отслаиваются от подложки. Очевидно, что такое покрытие не является устойчивым к истиранию и при механическом воздействии раскрошится легче, чем, например, покрытие, продемонстрированное на рисунке 7.

Выводы

В ходе анализа результатов экспериментов по электролитическому осаждению покрытий из сплава NiW были выявлены следующие закономерности:

В пирофосфатном электролите при осаждении в гальваностатическом режиме увеличение плотности тока приводит к увеличению толщины пленки. Это является положительным результатом, однако, с увеличением плотности тока также происходит увеличение размеров глобул, что нарушает однородность покрытия и увеличивает его шероховатость, что нежелательно.

Кроме того, при определенных плотностях тока (6 А/дм^2 и выше) возможно образование клиновидных дефектов на поверхности пленки, что отрицательным образом сказывается на механической прочности и коррозионной стойкости покрытия. При плотности тока 20 А/дм^2 дефекты присутствуют в меньшем количестве и сосредоточены главным образом на поверхности небольших глобул, окруженных глобулами более крупного размера, что может говорить о том, что возникновение дефектов связано с внутренними напряжениями.

Осаждение в импульсном режиме позволяет получать более однородные покрытия без существенной потери в толщине пленки, а также не приводит к появлению клиновидных дефектов, что делает этот способ более предпочтительным с точки зрения качества. Использование режима линейно нарастающего тока приводит к формированию покрытий с относительно однородной поверхностью (с точки зрения распределения средних диаметров глобул), но поверхность эта покрыта глубокими широкими трещинами и разбита на отдельные участки, края которых отслаиваются от подложки, что отрицательно влияет на механические свойства и долговечность.

Библиографический список

1. N. Eliaza, T.M. Sridhar, E. Gileadi «Синтез покрытий из сплава никель-вольфрам и их свойства», www.sciencedirect.com, 2004. 12 с, пер. с английского.
2. Вячеславов П.М. «Электролитическое осаждение сплавов», Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1986. 112 с.
3. Tohru Yamasaki «Высокопрочные кристаллические сплавы Ni-W, полученные методом электролитического осаждения», Advanced Study Center Co. Ltd, 2000, 6с, пер. с английского.
4. N. Tsyntsaru, H. Cesiulis, M. Donten, J. Sort, E. Pellicer, E. J. Podlaha-Murphy «Современные направления в электролитическом осаждении сплавов вольфрама с металлами группы железа», 2015. 32 с, пер. с английского.

УДК 544.653.1; ГРНТИ 31.15.33

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОДИСПЕРСНОГО ПОРОШКА WO_3 ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Ю.М. Стрючкова, В.С. Логинов, Н.Б. Рыбин, Д.В. Суворов
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, julms@yandex.ru

Аннотация. Исследована технология получения высокодисперсного порошка WO_3 с контролируемыми геометрическими характеристиками электрохимическим методом. Показано влияние величины плотности тока на размер частиц триоксида вольфрама.

Ключевые слова: триоксид вольфрама, электрохимический синтез, растровая электронная микроскопия.

SYNTHESIS OF THE NANODISPERSE POWDER WO_3 BY THE ELECTROCHEMICAL METHOD

Yu.M. Stryuchkova, V.S. Loginov, N.B. Rybin, D.V. Suvorov
Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, Russia, julms@yandex.ru

Abstract. The technology of synthesis of the high-disperse powder WO_3 with controlled geometrical characteristics by an electrochemical method is investigated. Influence of current density value on the size of wolfram trioxide particles is shown.

Keywords: wolfram trioxide, electrochemical synthesis, scanning electron microscopy.

Нанодисперсные материалы прочно вошли в нашу жизнь, заняв свою нишу в различных областях науки и техники. Триоксид вольфрама среди таких материалов представляет особенный интерес для исследований и синтеза из-за его оптических, каталитических и электрических свойств. WO_3 используют в ячейках для превращения и хранения солнечной энергии; в качестве газочувствительных элементов, для которых характерно изменение оптических свойств за счёт обратимой хемосорбции активных газов на их поверхности; в качестве катализаторов различных химических процессов, например, для разложения аммиака на атомарный азот и водород. Кроме того, из триоксида вольфрама синтезируют кристаллы вольфрамата кадмия $CdWO_4$, которые используют в качестве сцинтилляторов, люминесцирующих в видимой области спектра [1,2].

Целью данной работы являлось исследование влияния плотности тока на геометрические характеристики WO_3, получаемого с помощью электрохимического метода. Традиционно триоксид вольфрама получали, создавая вакуум или используя высокие температуры. Электрохимический метод не требует высоких энергетических затрат или дорогостоящего оборудования, вследствие чего он представляется наиболее доступным и перспективным.

Катодное осаждение проводили из электролита на основе серной кислоты следующего состава, г/л:

вольфрамовокислый натрий - 30;
борная кислота - 50;
сернокислый аммоний - 30;
перекись водорода (30%) мл/л - 30;
серная кислота - 245;
pH электролита - 2,0.

Электрохимический синтез проводили в гальваностатическом режиме в двухэлектродной ячейке при постоянной температуре 50°С в течение 10 мин. Катодную плотность тока изменяли в пределах от 1 до 15 А/дм^2. В качестве катода использовали пластины из никеля марки Н1 толщиной 500 мкм, в качестве анода - платиновую фольгу. Рабочую поверхность катода полировали до зеркального блеска алмазной пастой НОМ 0,5/0, затем образцы промывали по 10 мин в ацетоне и спирте, на заключительной стадии в дистиллированной воде.

Следует отметить, что изначально на катоде восстанавливалась пятиокись вольфрама W_2O_5 сине-фиолетового цвета, которая после контакта с кислородом воздуха превращалась в триоксид вольфрама WO_3 лимонно-жёлтого цвета:

$$2WO_4^{2-} + 10H^+ + 1\bar{e} \rightarrow W_2O_5 + 5H_2O;$$

$W_2O_5 + 1/2O_2 \rightarrow 2WO_3$.

Процесс окисления W_2O_5 до WO_3 занимал 2 – 7 суток, в зависимости от толщины осаждённого оксида.

Морфологию полученных образцов триоксида вольфрама изучали методом растровой электронной микроскопии. Синтезируемый электрохимическим методом триокид вольфрама представляет собой порошок, состоящий из рыхлых агломератов наночастиц. Размер частиц WO_3 составил от 50 до 300 нм. Общий вид одного из образцов при различных увеличениях приведен на рисунке 1.

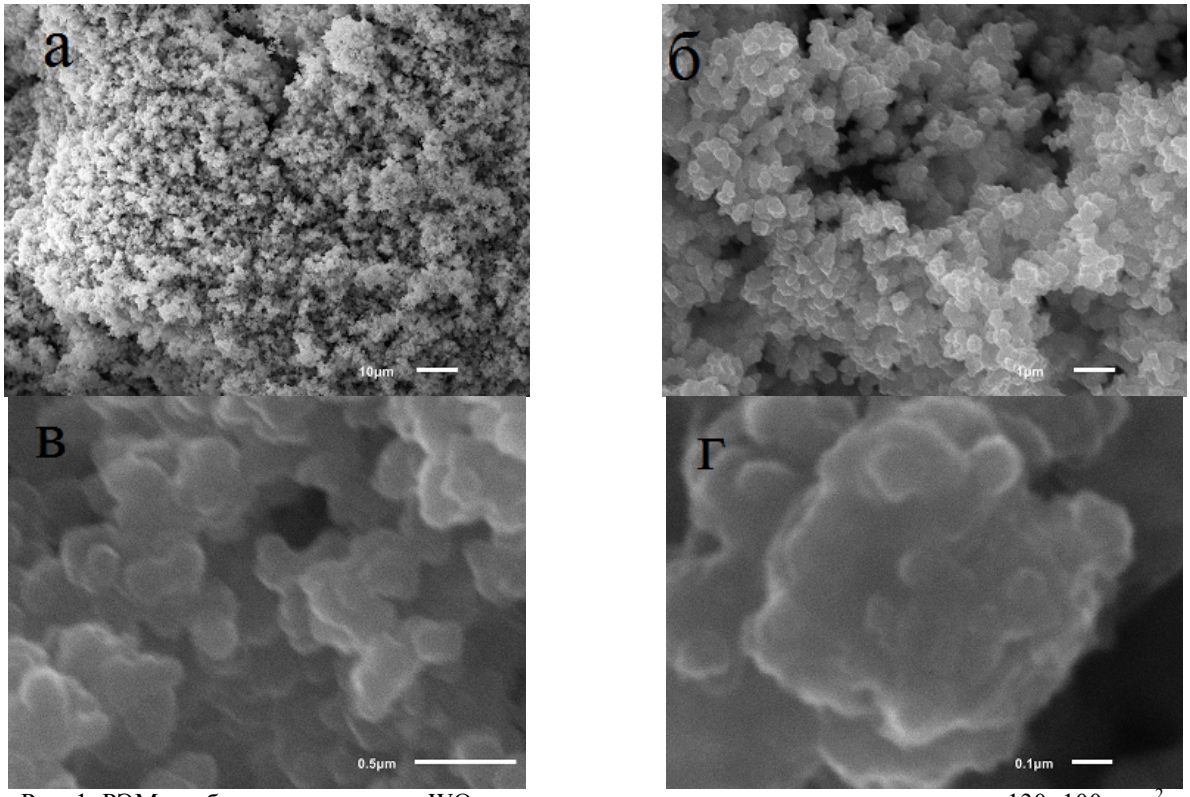


Рис. 1. РЭМ-изображения порошка WO_3 при различных увеличениях: а – размер поля 130×100 мкм^2, б – размер поля 13×10 мкм^2, в – размер поля 6×5 мкм^2, г – размер поля 1,3×1 мкм^2. Плотность тока 2 А/дм^2

Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии определяли процентное содержание вольфрама и кислорода в осаждённом оксиде. На рисунке 2 приведен ЭД-спектр триоксида вольфрама, полученный для одного из образцов. Спектры снимали локально в точках, выбранных на предварительно полученном изображении поверхности WO_3, а также по сетке из 10×10 точек. Анализ полученных данных показал, что содержание вольфрама составило 22-24 ат. %, кислорода – 70-73 ат. %. Такое соотношение соответствует молекулярной формуле WO_3. В ЭД-спектрах помимо пиков от вольфрама и кислорода также определяются пики от азота, серы и никеля. Следы азота и серы попадали в порошок триоксида вольфрама из электролита, из которого его осаждали на никелевую подложку. Следы подложки видны потому, что при снятии спектров методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии пучок электронов проходил насквозь через порошок WO_3 и взаимодействовал, в том числе, и с никелем.

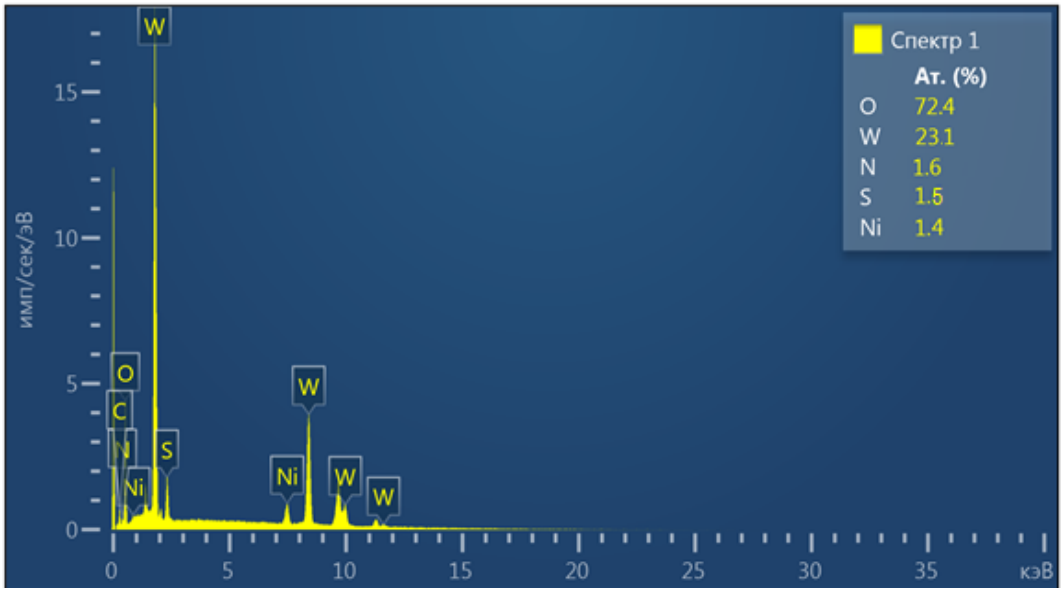


Рис. 2. ЭД-спектр триоксида вольфрама. Спектр измерен при ускоряющем напряжении 20 кэВ

Проведена серия экспериментов по исследованию влияния катодной плотности тока на размер частиц осаждаемого WO_3. В результате определили, что оптимальная катодная плотность тока для осаждения оксида вольфрама из используемого электролита составила 1-4 А/дм^2. При такой плотности тока осадок имеет наиболее высокую степень дисперсности и, следовательно, удельную поверхность. Зависимость среднего размера частиц WO_3 от катодной плотности тока показана на рисунке 3.

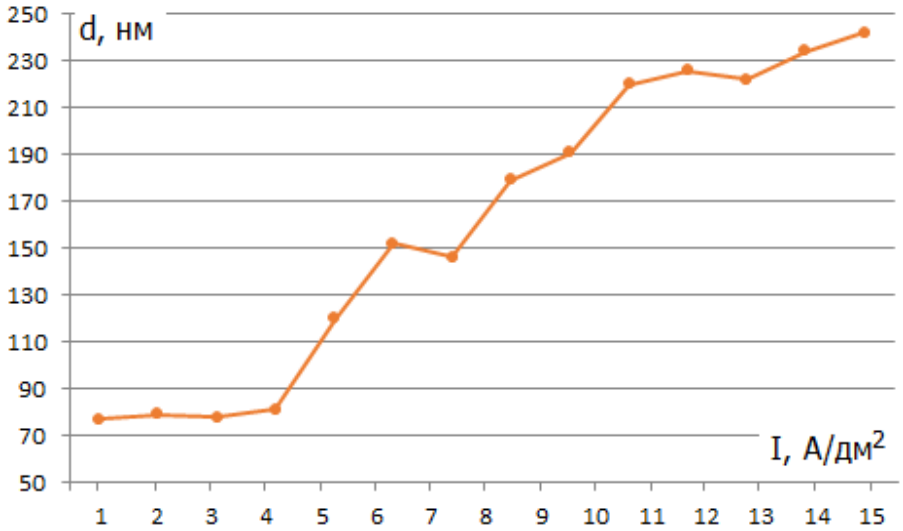


Рис. 3. Зависимость диаметра частиц WO_3 от катодной плотности тока

Из рисунка видно, что с увеличением плотности тока средний размер частиц WO_3 увеличивается. При этом в осадках, полученных при плотностях тока 10-15 А/дм^2, встречаются частицы с размером 50-70 нм, но в значительно меньших количествах, чем в образцах, осаждённых при более низких плотностях тока.

В результате проведённых экспериментов установлено, что оптимальная катодная плотность тока при восстановлении оксида вольфрама из сернокислого электролита составила 1-4 А/дм^2. При увеличении плотности тока увеличивается средний размер частиц WO_3. Влияния плотности тока на состав осаждаемого оксида не выявлено.

Библиографический список

1. Deb S.K. Opportunities and challenges in science and technology of WO_3 for electrochromic and related applications // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2008. V.92. P. 245-258.

2. A. Yoshikava, V. Chani and M. Nikl. Czochralski growth and properties of scintillating crystals // Acta physica polonica A. 2013. V.124. P. 250-264.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.35

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЁНОК ОКСИДОВ ЦИНКА И МЕДИ

А.А. Мархабаева, Л.В. Гриценко, Ж.К. Калкозова, Х.А. Абдуллин

Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа при КазНУ им. аль-Фараби, г. Алматы,Республика Казахстан

Аннотация. Массивы наностержнейZnOна кремниевых и стеклянных подложках синтезированы гидротермальным методом, исследованы спектры фотолюминесценции и электрические свойства. Обнаружено существенное падение электрического сопротивления после кратковременной обработки в водородной плазме. Получены гетеропереходы на основе оксидов цинка-меди.

*Ключевые слова:*массивы наностержнейZnO, гидротермальный метод, гетеропереходы.

EFFECTS OF THERMAL ANNEALING AND PLASMA TREATMENT ON PROPERTIES OF ZINC AND COPPER OXIDES THIN FILMS

A.A. Marhabaeva, L.V. Gritsenko, Zh.K. Kalkozova, Kh.A. Abdullin

National Nanotechnology Laboratory of the open type at the Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan

Abstract. Arrays of ZnOnanorods on silicon and glass substrates were synthesized by hydrothermal method. The photoluminescence spectra and the electrical properties were studied. A significant decrease in electrical resistance after short-term treatment in a hydrogen plasma is detected. Heterojunctions based on copper-zinc oxides have been obtained.

Keywords:arrays of ZnOnanorods, hydrothermal method, heterojunctions.

1. Введение

Оксидные наноструктурированные полупроводники, такие, как ZnO, CuO, Cu_2O, имеют широкую область применения, и в настоящее время весьма интенсивно исследуются. Актуальными областями применения этих материалов являются проводящие и прозрачные покрытия, сенсоры, солнечные элементыи др. [1-3]. В настоящейработе приведены результаты по развитию методов синтеза материалов на основе оксидных полупроводников ZnO, CuO, Cu_2O, по исследованию свойств электрических, оптических, люминесцентных свойств полученных образцов в зависимости от технологических условий синтеза.

2. Экспериментальные результаты

ОбразцыZnOсинтезированы гидротермальным методом при 95°C из раствора с нитратом цинка и уротропином при 90°C. Образцы полученыв виде массива наностержней, морфология которых показана на рисунке 1.

Спектры фотолюминесценции образцов ZnOприведены на рисунке 2. Спектры фотолюминесценции измерены при комнатной температуре при длине возбуждающего света 300 нм. Спектр состоит из полосы собственной фотолюминесценции с максимумом при 378 нм, и полосы люминесценции, возникающей при излучательных переходах через глубокие уровни, расположенные в запрещенной зоне, с максимумом при 560 нм. Интенсивная собственная фотолюминесценция при 378 нм свидетельствует о низкой концентрации рекомбинационных центров и о высоком совершенстве выращенного оксида цинка в виде массива наностержней.

При отжиге на воздухе происходит гашение собственной фотолюминесценции. Интенсивность люминесценции через глубокие уровни ведет себя немонотонно от температуры отжига на воздухе, достигая максимума при отжиге 400°C. Максимум полосы люминесценции через глубокие уровни сдвигается в длинноволновую область 610 нм.

На рисунке 3 показаны спектры оптического пропускания и оптической плотности двух образцов массивов наностержнейZnO на стеклянных подложках, выращенных в одинаковых условиях, но с различной длительностью роста: 30 мин и 2 часа. Видно, что для образца с меньшим временем синтеза (30 мин) оптическая плотность ниже, а коэффициент пропускания выше, чем для образца с временем синтеза 2часа. На спектрах пропускания наблюдаются небольшие колебания, вызванные интерференцией света в слое, что говорит об однородности слоя.

Измерено электрическое слоевое сопротивление слоев ZnO, синтезированных на стеклянных подложках. Для этого на образцы размерами 1×2 см^2 методом вакуумного напыления алюминия наносились электрические контакты так, чтобы в середине образца оставался незакрытым слой ZnO в виде квадрата 1×1 см. Электрическое сопротивление между контактами в такой конфигурации равно слоевому сопротивлению. Величина слоевого сопротивления в образцах сразу после синтеза составляло в зависимости от времени синтеза от 100 до 600 кОм/□ в нелегированных слоях. Слоевое сопротивление может быть существенно понижено либо путем легирования, либо отжига в вакууме, либо путем плазменной водородной обработкой.

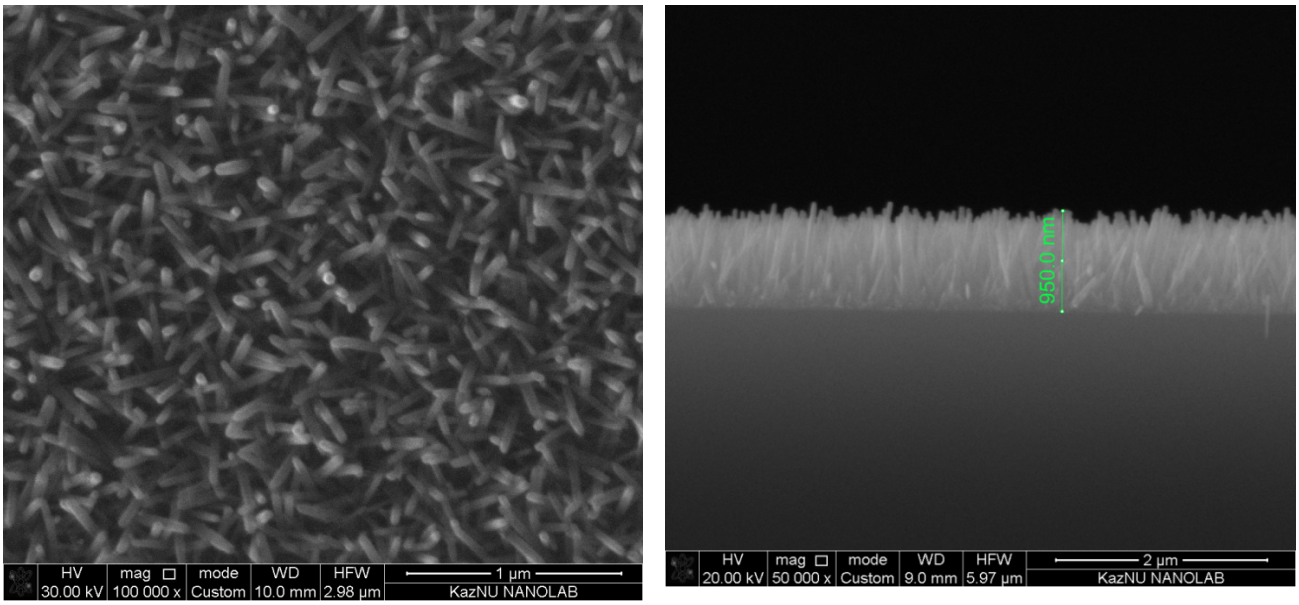


Рис. 1. Морфология слоев ZnO, выращенных гидротермальным методом

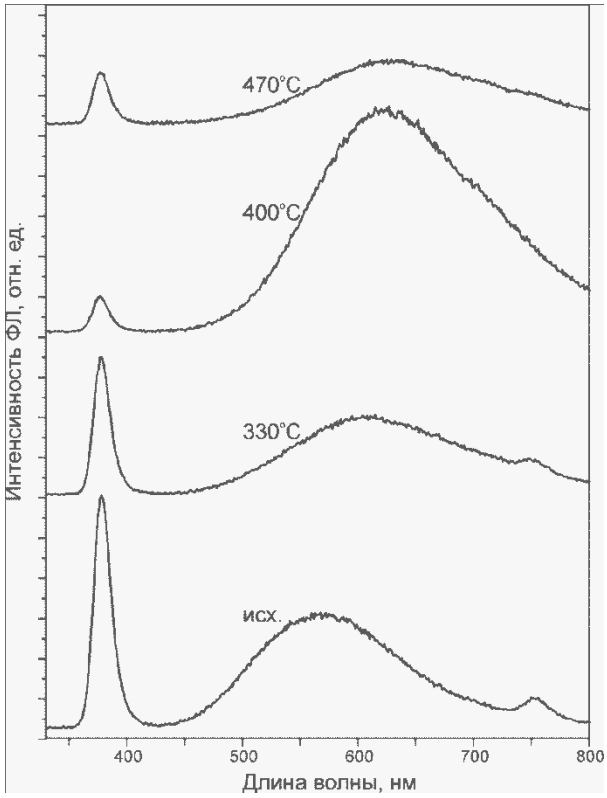


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции образцов массива наностержнейZnO, синтезированных гидротермальным методом при 95°C: 1 – исходный спектр, 2-4 – спектры после отжига на воздухе в течение 25 мин при 330, 400 и 470°C соответственно

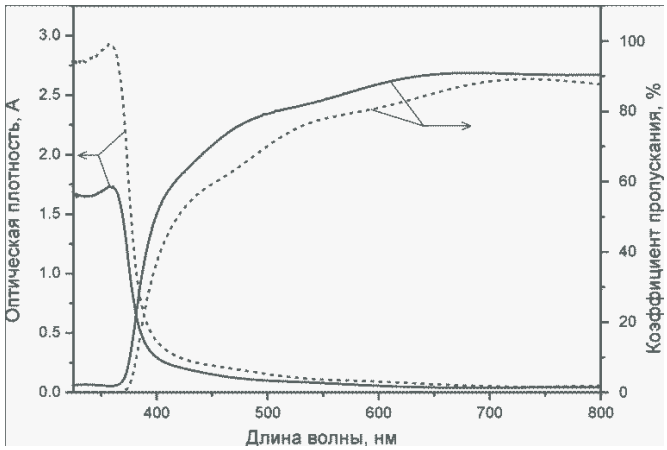


Рис.3. Спектры оптического пропускания и оптической плотности образцов массивов наностержнейZnO на стеклянных подложках, выращенных в одинаковых условиях за 30 мин (сплошная линия) и за 2 часа (пунктир)

Плазменная водородная обработка образцов проводилась в кварцевом реакторе, оснащенным боковыми фланцами для откачки и для подачи в объем реактора рабочего газа. Водород подавался через игольчатый натекатель, откачка осуществлялась форвакуумным насосом, давление контролировалось вакуумметром. Плазма создавалась в разряде емкостного типа на частоте 27 МГц. Обработка велась при фиксированном давлении газа в реакторе (~60 Па) и мощности ВЧ-генератора ~15 Вт. Специальный нагрев образцов при плазменной обработке не применялся. Типичное время обработки составляло 4 минуты.

В случае плазменной обработки в водородной атмосфере наблюдается резкое падение слоевого сопротивления. Как видно из таблицы 1, кратковременная обработка приводит к падению сопротивления в ~40-300 раз. Сопротивление в несколько кОм/□ является приемлемым для создания фоточувствительного электрода, поскольку такие электроды в виде тонких слоев формируются на прозрачных проводящих подложках (ITO, FTO).

Таблица 1 - Слоевое сопротивление образцов из массивов наностержнейZnO, исходное и после плазменной обработки в атмосфере водорода приводит к падению сопротивления в ~40-300 раз

Слоевое сопротивление		
Rисходн., кОм/□	R после H-плазмы, Ом/□	Кратность уменьшения
625	3464	180
39.2	1056	37
127.5	2113	60
655	1992	329

Таким образом, плазменная водородная обработка является эффективным способом улучшения электрических свойств оксида цинка.

Рамановские спектры композитов ZnO-CuO, полученных путем вакуумного термического распыления меди на массивы наностержнейZnO с последующим отжигом, показаны на рисунке 4. Для сравнения приведен также спектр чистого ZnO. Как видно из рисунка, отжиг при 300°C формирует фазу Cu_2O, что видно из сравнения полученных спектров с литературными данными для рамановских спектров Cu_2O [4]. Отжиг при 500°C приводит к преобладанию фазы оксида цинка CuO.

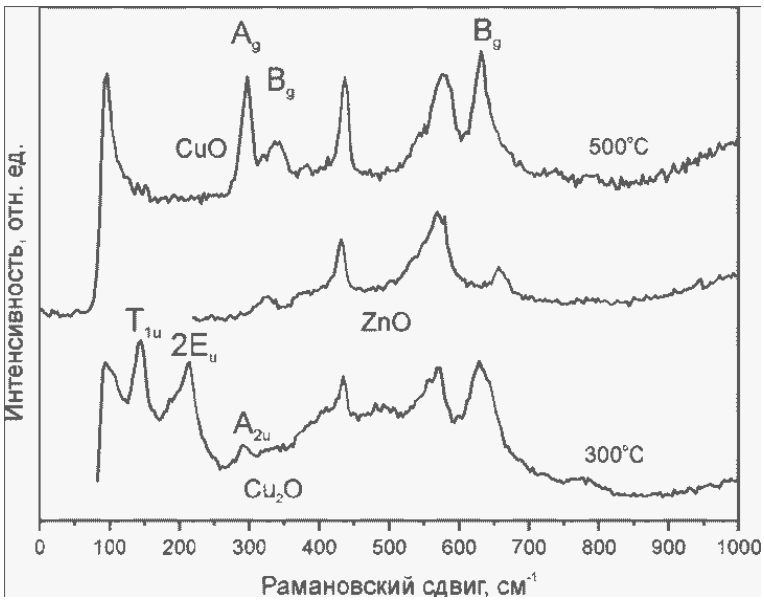


Рис. 4. Рамановские спектры образцов массива наностержней оксида цинка с напыленной тонкой пленкой меди после отжига при 300 и 500°С, для сравнения показан также рамановский спектр чистого ZnO

На рисунке 5 показаны спектры оптического пропускания исходного массива наностержней оксида цинка (кривая 1). Затем на слой оксида цинка была напылена тонкая пленка меди, и проведен отжиг при 180°С. Этому случаю соответствует кривая 2 на рисунке 5. Видно, что при отжиге 180°С растет поглощение в районе длин волн 500 нм из-за появления Cu_2O, который, согласно литературным данным, является прямозонным полупроводником с энергией запрещенной зоны 2.137 эВ при комнатной температуре [4]. Дальнейший отжиг при 400°С приводит к падению пропускания с краем в области 800 нм за счет появления CuO, который является непрямозонным материалом и имеет энергию запрещенной зоны 1.35 эВ [4]. Эти результаты совпадают с данными по рамановским спектрам.

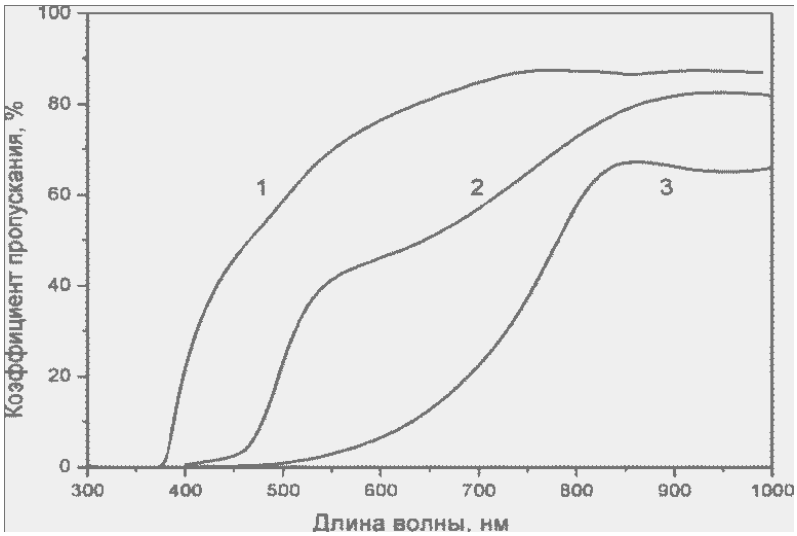


Рис. 5. Спектры оптического пропускания исходного массива наностержней оксида цинка (кривая 1), после напыления тонкой пленки меди с последующим отжигом на воздухе при 180°С (2) и 400°С (3)

Были сформированы структуры, состоящие из слоев ZnO на ITO стеклянных подложках, поверх которых через маску напылялся слой меди. После отжига на воздухе формировалась полупрозрачная пленка оксидов меди. Отжиг проводился при различных температурах и длительностях для оптимизации.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) полученных структур имеют диодный характер. Наиболее ассиметричные ВАХи были получены при отжиге 220°С в течение 4 часов. Коэффициент идеальности n вольт-амперной зависимости диода ($I = I_s(\exp(V/nV_T)$, где I_s - ток насыщения, V_T – термическое напряжение) примерно равнялся 3 в интервале напряжений от 0 до 0.2 В, затем увеличивался до 8 в области прямых смещений до 1.3 В. Высокие значения n совпадают с литературными данными [5-6] по характеристикам переходов n-ZnO/p-(Cu_2O-CuO) и свидетельствуют о критической роли туннельного тока и рекомбинации на границе. Как известно [6], гетеропереходы n-ZnO/p-CuO демонстрируют ВАХи с большими факторами идеальности диода n, что говорит о значительном вкладе процессов туннелирования через поверхностные состояния, вводимые структурными дефектами.

О доминировании многоступенчатых процессовтуннелирования и рекомбинации черезловушкив структуре n-ZnO/p-CuO свидетельствуют литературные данные по температурным зависимостям ВАХ [5]. Существенен также процесс туннелирования через тонкий слой объемного заряда, поэтому для снижения фактора идеальности и подавления туннельных токов утечки создают слой высокоомногоZnO на границе гетероструктуры [5], а также применяют отжиг на воздухе, оптимальные температуры отжига составляют 250-300°С.

Структуры проявляют чувствительность к освещению белым светом – при освещении галогеновой лампой растет прямой ток через точечный контакт. Известно [6], что обработка в водородной плазме существенно изменяет электрические и фотолюминесцентные свойства ZnO. Мы также провели плазменную обработку пленок ZnO и p-n-структур в атмосфере водорода. Обнаружено, что обработка исходных пленок ZnO приводит к уменьшению слоевого сопротивления пленок на 20%. Интересно отметить, что водородная обработка p-n-структур на основе ZnO и оксидов меди приводит к значительному уменьшению тока утечки при обратных смещениях. Это можно связать с водородной пассивацией поверхностных дефектных состояний и уменьшением рекомбинационного тока перехода.

Выводы

Методом гидротермального синтеза получены пленки ZnO, а гетероструктурыZnO/Cu_2O(CuO) получены термическим окислением пленки меди, нанесенной на оксид цинка. Исследовано влияние термического отжига и обработки в водородной плазме на оптические, фотолюминесцентные, электрические и структурные свойства образцов. Обнаружено, что обработка в водородной плазме исходных пленок ZnO приводит к значительному уменьшению слоевого сопротивления пленок, кратность уменьшениясоставляла до 300 раз. Кратковременная обработкаструктур n-ZnO/p-Cu_2O(CuO) в водородной плазме улучшает их электрические характеристики.

Библиографический список

1. Andreas Stadler. Transparent Conducting Oxides - An Up-To-Date Overview. Materials 2012, 5, 661-683; doi:10.3390/ma5040661.
2. Elvira Fortunato, Pedro Barquinha, R. Martins. Oxide Semiconductor Thin-Film Transistors: A Review of Recent Advances. Adv Mater. 2012 Jun 12;24(22):2945-86.
3. Rajesh Kumar, O. Al-Dossary, GirishKumar, Ahmad Umar. Zinc Oxide Nanostructures for NO2 Gas Sensor Applications: A Review. Nano-Micro Letters 2015, 7(2), pp 97-120.
4. MeyerB. K., PolityA., ReppinD., BeckerM., HeringP., KlarP. J., SanderTh., ReindlC., BenzJ., EickhoffM., HeiligerC., HeinemannM., BläsingJ., KrostA., ShokovetsS., MüllerC., RonningC. Phys. StatusSolidiB. -2012. –Vol. 249, No. 8. –P. 1487–1509.
5. ÖzyurtKuş F., Serin T., Serin N. // Journal of optoelectronics and advanced materials. - 2009. -Vol. 11, No. 11.- P. 1855 – 1859.
6. Lorite I., Wasik J., Michalsky T., Schmidt-Grund R., Esquinazi P.Hydrogen influence on the electrical and optical properties of ZnO thin films grown under different atmospheres // Thin Solid Films. -2014. –Vol. 556. –P. 18-22.

УДК 537.312; ГРНТИ 29.19.31

РАЗРАБОТКА ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

А.А. Кривушин[*], В.В. Трегулов[**]

[*]*Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова, Россия, Рязань, a.krivushin@rsu.edu.ru*

[**]*Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина, Россия, Рязань, v.tregulov@rsu.edu.ru*

Аннотация. В данной работе представлена схема полупроводниковой структуры фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии с топологией поверхности. Описан технологический процесс формирования полупроводниковой структуры, а так же проведен анализ вольт-амперных характеристик экспериментальных образцов ФЭП при освещении.

Ключевые слова: полупроводник, пористый кремний, фотовольтаика, космическое пространство.

DEVELOPMENT OF A SEMICONDUCTOR STRUCTURE OF A PHOTOELECTRIC SOLAR ENERGY CONVERTER FOR USE IN SPACE

A.A. Krivushin[*], V.V. Tregulov[**]

[*]*Ryazan State Medical University, Russia, Ryazan, a.krivushin@rsu.edu.ru*

[**]*Ryazan State University, Russia, Ryazan, v.tregulov@rsu.edu.ru*

Abstract. In paper, a diagram of the semiconductor structure of the photovoltaic solar inverter topology surface. It describes a process of forming a semiconductor structure, as well as an analysis of the current-voltage characteristics of the experimental samples of solar cells under illumination.

Keywords: semiconductor, porous silicon, photovoltaics, space.

Схема полупроводниковой структуры ФЭП

Так как одним из важнейших факторов влияния космического пространства является ионизирующее излучение, то ФЭП, расположенные на внешних поверхностях космических аппаратов должны иметь повышенную радиационную стойкость [1]. Ионизирующее излучение способно создавать в объеме полупроводника и на границах раздела активных слоев дефекты с глубокими энергетическими уровнями. Эти дефекты, как правило, вызывают рекомбинацию носителей заряда, что приводит к снижению КПД ФЭП и необратимой деградации оптических и электрофизических характеристик [2]. Наиболее вредное влияние на КПД ФЭП будут оказывать дефекты, локализованные непосредственно на границе раздела *n*- и *p*-областей активного *p–n*-перехода (поверхностные состояния) и в приповерхностной части базовой области, где происходит фотогенерация носителей заряда [3].

Разрабатываемый ФЭП базируется на традиционной кремниевой структуре с диффузионным n^+–*p*-переходом, залегающим на глубине не более 0,5 мкм от фронтальной поверхности.

С целью минимизации влияния радиационных дефектов на работу ФЭП предлагаются следующие меры:

– снижение эффективной площади n^+–*p*-перехода (при неизменной площади базового слоя) с помощью процесса наноструктурирования;

– размещение поглощающего слоя внутри пленки пористого кремния (*por-Si*).

Как известно из ряда публикаций, например [4,5,6,7], *por-Si* имеет более высокую радиационную стойкость по сравнению с кристаллическим кремнием. Причиной этого авторы [5,7] считают сильно развитую поверхность *por-Si*, которая может работать в качестве области стока и аннигиляции радиационных дефектов. Кроме того, при взаимодействии высокоэнергетичных частиц с элементами структуры *por-Si* возможна передача энергии не только отдельным атомам, но и кластерам кремниевых кристаллитов. Такая передача энергии возможна вследствие изменения фононного спектра в кремниевых кристаллитах. Энергия, получаемая группами атомов в *por-Si*, будет меньше величины, принимаемой отдельными атомами, что снизит разрушающее воздействие высокоэнергетичных частиц.

Схематическое изображение слоев предлагаемой полупроводниковой структуры ФЭП, представлено на рисунке 1.

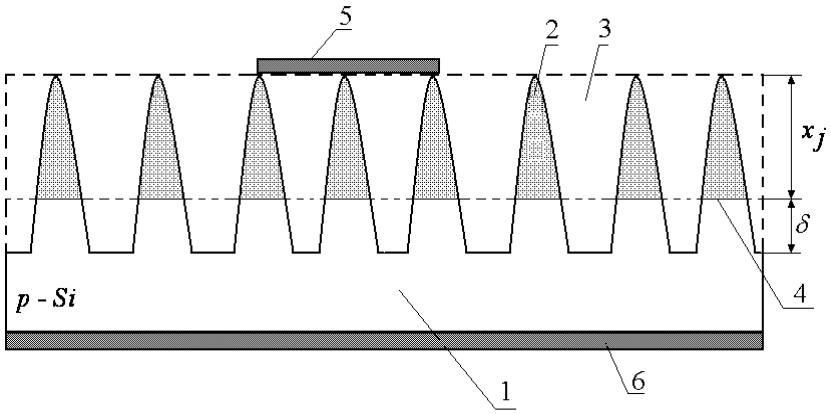


Рис. 1. Схема полупроводниковой структуры ФЭП

Основой полупроводниковой структуры (рис. 1) является кремниевая подложка *p*-типа проводимости 1. На ней методом термической диффузии сформирован n^+–*p*-переход глубиной залегания x_j. На фронтальной поверхности полупроводниковой структуры сформирован слой *por-Si* таким образом, что его толщина превышает глубину залегания n^+–*p*-перехода на величину δ. Слой *por-Si* образован кремниевыми кристаллитами 2, которые разделены порами 3, заполненными продуктами реакции электрохимического травления кремния (SiO, SiO_x). В результате плоскость n^+–*p*-перехода 4 находится внутри слоя *por-Si*. При этом вершины кремниевых кристаллитов образованы материалом n^+-слоя. Поглощение света и образование носителей заряда происходит в нижней части пористой пленки, находящейся в *p-Si* (рис. 1). Таким образом, реализуются приведенные выше меры минимизации влияния радиационных дефектов на работу ФЭП.

Для подключения ФЭП к внешним электрическим цепям на фронтальной области сформированы металлические (серебряные) контакты в виде тонких длинных полосок 5 (рис. 1). На тыльной области сформирована контактная металлическая сетка 6 (серебро-алюминий).

Топология фронтальной поверхности ФЭП представлена на рисунке 2.

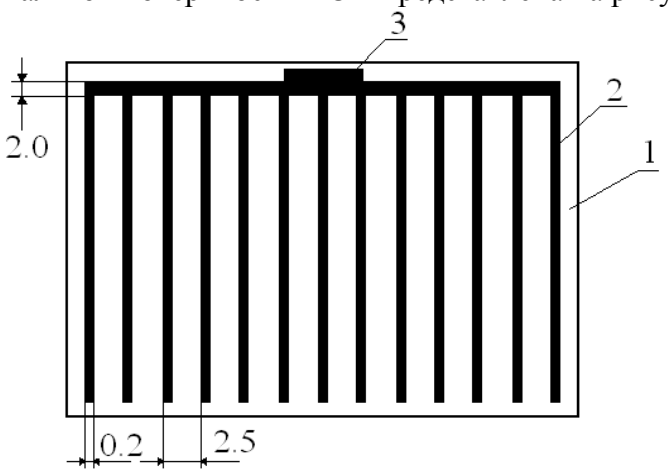


Рис. 2. Топология фронтальной поверхности ФЭП

На фронтальной поверхности 1 сформирован Ш-образный металлический контакт 2 с площадкой 3, предназначенной для пайки внешнего электрического вывода (рис. 2). Размеры наиболее критичных фрагментов указаны на рисунке 2 в миллиметрах.

Технология изготовления ФЭП

В качестве подложек для изготовления ФЭП используются пластины монокристаллического кремния «солнечного качества» со следующими характеристиками: проводимость *p*-типа, удельное сопротивление 1 Ом·см, ориентация поверхности (100), время жизни неосновных неравновесных носителей заряда 50 мкс.

Технологический процесс формирования полупроводниковой структуры ФЭП состоит из следующих этапов.

1. Отмывка пластин от грубых загрязнений (смесь азотной и соляной кислот), промывка в дистиллированной воде (ультразвуковая ванна).

2. Травление в водном растворе *KOH* (20%), температура 90°С, 10 минут для формирования текстурированной структуры. Промывка в дистиллированной воде (ультразвуковая ванна).

3. Термическая диффузия (диффузант – фосфор) для создания n^+-области на фронтальной поверхности. Цель операции – создание n^+–*p*-перехода.

3.1. Нанесение диффузанта H_3PO_4:C_2H_5OH, сушка 80°С, 30 мин в сушильном шкафу.

3.2. Термическая диффузия при T = 1100°С в течении 10 минут в электрической трубчатой печи с резистивным нагревом.

3.3. Отмывка пластины в водном растворе *HF* (10%) для удаления с поверхности фосфоросиликатного стекла. Промывка в дистиллированной воде (ультразвуковая ванна).

4. Выращивание на фронтальной поверхности пленки *por-Si*. Использовался метод анодного электрохимического травления в гальваностатическом режиме. Экспериментальные образцы изготавливались при разных значениях плотности тока ($J_{эх}$) в диапазоне 10 – 20 мА/см^2 и в течении различных промежутков времени ($\tau_{эх}$) в диапазоне 30 – 60 с. После формирования слоя *por-Si* производилась промывка пластин в дистиллированной воде (ультразвуковая ванна) с целью удаления остатков электролита.

5. Нанесение на фронтальную поверхность серебряной пасты через трафарет для формирования топологии проводящего контакта. Нанесение на тыльную область серебряно-алюминиевой пасты через трафарет для формирования тыльного контакта. Сушка при температуре 20°С в течение 30 минут.

6. Отжиг пластин при температуре 250°С в течении 10 с для формирования омических контактов к фронтальной и тыльной поверхностям.

Наиболее критичными этапами процесса являлись формирование пленки *por-Si* (4 этап) и проведение отжига (6 этап). Технологические режимы выбирались из соображений достижения наиболее высоких показателей эффективности ФЭП (напряжение холостого хода, ток короткого замыкания). В ходе экспериментов было установлено, что оптимальное значение $J_{эх}$ составило 20 мА/см^2. При более низких значениях $J_{эх}$ формировались неоднородные по толщине пленки. При $J_{эх}$>20 мА/см^2 рост пленки *por-Si* протекал быстро и изготавливаемые структуры ФЭП имели низкий КПД (менее 0,10) уже при временах роста 20 с.

В результате было изготовлено 3 экспериментальных образца с технологическими параметрами, приведенными в таблице 1.

Таблица 1 - Технологические режимы электрохимического травления

образец	$J_{эх}$, мА/см^2	$\tau_{эх}$, с
1	20	30
2	20	40
3	20	60

Вольт-амперные характеристики экспериментальных образцов при освещении

С целью исследования эффективности экспериментальных образцов ФЭП проводились измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) при освещении в режиме АМ 1,5. Полученные ВАХ были типичными для полупроводниковых ФЭП и соответствуют общему виду, представленному на рисунке 3.

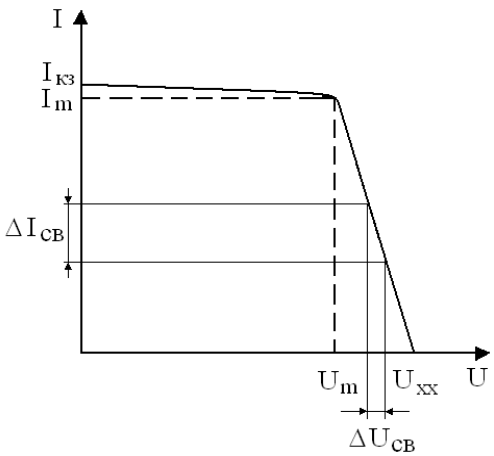


Рис. 3. Общий вид ВАХ ФЭП, измеренных при освещении

Сплошной линией на рисунке 3 показана экспериментальная кривая ВАХ. Пересечение этой кривой с осью напряжений характеризует значение напряжения холостого хода (U_{xx}), пересечение с осью токов – ток короткого замыкания ($I_{кз}$). Пунктирная линия на рисунке 3 ограничивает прямоугольник максимальной мощности ФЭП. Значения I_m и U_m характеризуют ток и напряжение, при которых реализуется максимальная выходная мощность. Отношение этих величин определяют фактор заполнения световой ВАХ [8]:

$$FF = \frac{I_m U_m}{I_{кз} U_{xx}}. \quad (1)$$

Фактор заполнения показывает, насколько ВАХ реального ФЭП приближается к идеальной. Величина КПД ФЭП определяется по формуле:

$$\eta = \frac{I_m U_m}{P_m} = \frac{FF \cdot I_{кз} U_{xx}}{P_m}, \quad (2)$$

где P_m – мощность излучения, падающего на фронтальную поверхность [8].

Также важной характеристикой, влияющей на КПД ФЭП является последовательное сопротивление $R_П$, которое определяется из экспериментальной ВАХ на рисунке 3 по формуле [8]:

$$R_П = \frac{\Delta U_{СВ}}{\Delta I_{СВ}}. \quad (3)$$

Величина $R_П$ в нашем случае определяется сопротивлением контактов к фронтальной и тыльной областям ФЭП, а также последовательным сопротивлением слоя *por-Si*. Для достижения максимального КПД величина $R_П$ должна быть как можно меньше.

Величины, характеризующие эффективность исследуемых экспериментальных образцов ФЭП, приведены в таблице 2. В качестве образца №4 выступал традиционный ФЭП на основе n^+–*p*-перехода без пленки *por-Si* на фронтальной поверхности.

Таблица 2 - Характеристики эффективности образцов ФЭП

образец	U_{xx}, мВ	$I_{кз}$, мА	*FF*, отн.ед.	η, %	$R_П$, Ом
1	530	38,0	0,86	17	6,1
2	509	19,3	0,83	11	7,0
3	499	15,0	0,77	6	9,0
4	523	27,0	0,80	12	5,9

Из результатов, представленных в таблице 2, следует, что наибольшей эффективностью обладает образец №1. Его КПД существенно больше, чем у традиционного ФЭП без пленки *por-Si* (образец №4). Эффективность ФЭП образцов №2 и №3 заметно ниже, по сравнению с образцом №1. Это можно объяснить тем, что с увеличением времени электрохими-

ческого травления (см. таблицу 1) растущая пленка *por-Si* нарушает плоскость n^+–*p*-перехода и приводит к образованию дефектов с глубокими энергетическими уровнями, которые выступают в качестве центров рекомбинации и снижают КПД ФЭП.

Библиографический список

1. Krivushin A.A. Problems of solar-terrestrial physics // Школа будущего. 2015. № 2. С. 20-25.
2. Bodyagin N.V., Vikhrov S.P., Larina T.G., Mursalov S.I. Research on amorphous silicon thin-film structure and growth processes using nonlinear dynamics methods / Materials Research Society Symposium Proceedings 2006 MRS Spring Meeting. Сер. "Amorphous and Polycrystalline Thin-Film Silicon Science and Technology - 2006" San Francisco, CA, 2007. С. 99-104.
3. Авачева Т.Г. Исследование самоорганизации структуры поверхности неупорядоченных полупроводниковых материалов / диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2009.
4. Авачёва Т.Г., Балашов Е.В., Вихров С.П., Бодягин Н.В., Мурсалов С.М., Старов П.Е. Исследование структуры поверхности неупорядоченных материалов с применением теории самоорганизации и атомно-силовой микроскопии // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2008. № 23. С. 129-133.
5. Трегулов В.В. Пористый кремний: технология, свойства, применение: моногр. / В.В. Трегулов; Ряз. гос. ун-т им. С.А. Есенина. – Рязань, 2011. – 124 с.
6. Трегулов В.В. Особенности высокочастотной вольт-фарадной характеристики фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии на основе кремниевого p-n-перехода с антиотражающим слоем пористого кремния // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. № 9. С. 153-154.
7. Ушаков В.В. Радиационная стойкость пористого кремния. В.В. Ушаков, В.А. Дравин, Н.Н. Мельник, В.А. Караванский, Е.А. Константинова, В.Ю. Тимошенко. // Физика и техника полупроводников. – Т. 31, № 9. 1997. – С. 1126–1130 .
8. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. – Т. 2.– 456 с.

УДК539.23; 539.216.1; МРНТИ 29.19.22; 29.19.21; 28.17.23

ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛОФУЛЛЕРЕНОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО РАЗРЯДА

М.Т. Габдуллин[*], Д.В. Щур[**], Д.В. Исмаилов[*], Д.Г. Батрышев[***], Р.Р. Немкаева[*], Д.С.Керимбеков[***], Ж. Аяганов [*]

**Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа при КазНУ им. аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан*

***Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, г. Киев, Украина*

****Лаборатория инженерного профиля при КазНУ им. аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан*

daurenks@bk.ru

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты исследования свойств металлфуллеренов, их характеристик, оптимальные условия при которых достигнуты наибольший выход металлфуллеренов.

Ключевые слова: металлофуллерен, электродуговой синтез, оптический микроскоп, рамановская спектроскопия.

OBTAINING METALLOFULLERENES BY ELECTRIC DISCHARGE

M.T. Gabdullin *, D.V. Schur **, DV Ismailov *, D.G. Batryshev *, R.R. Nemkaeva***
D.S. Kerimbekov *, J.E. Ayaganov***

** National Nanotechnology Laboratory of open type with the KNU them. Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan*

*** Institute for Problems of Materials. IN Frantsevich National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine*

**** Laboratory of Engineering Profile at Kazakh National University. Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan*

Annotation. This paper presents the results of the properties of metallofullerenes, its characteristics, optimum conditions under which the highest yield of fullerenes achieved.

Keywords: metallofullerenes, electric arc synthesis, optical microscope, Raman spectroscopy.

Интерес к изучению металлофуллеренов обусловлен возможностью их широкого применения в различных областях науки и техники. Металлофуллерены имеют специфические электронные свойства и являются предметом интереса IT-индустрии как возможные кандидаты на материалы для устройств хранения данных наномасштаба. Исследование свойств этих систем стимулировало наблюдение сверхпроводимости в кристаллах C60 с

примесями щелочных металлов [1]. Исследователи из Швейцарской федеральной лаборатории тестирования и исследования материалов) открыли, что металлофуллерены способны формировать упорядоченные надмолекулярные структуры с разнообразной ориентацией. Манипулируя ею, возможно, хранить и считывать информацию. Углерод существует в форме алмаза, графита и нанотрубок, а также так называемых фуллеренов. Сферические структуры из таких фуллереновых "клеток" – наиболее часто исследуемые образцы, в которых содержатся 60 атомов углерода и выглядят, как футбольный мяч – также могут служить "нано-контейнерами" для металлических частиц.

Металлофуллерены могут быть синтезированы обычно двумя способами, подобно синтезу пустых фуллеренов, которые заключаются в формировании углерод-насыщенного пара или плазмы в атмосфере гелия или аргона. На сегодняшний день чаще всего применяют два метода для получения макроскопических количеств металлофуллеренов: высокотемпературное лазерное испарение или метод «лазерной печи» и метод электродугового разряда на постоянном токе. В этих методах одновременно формируется смесь пустых фуллеренов (C_{60}, C_{70}, C_{76}, C_{84} и т.д.) с металлофуллеренами. Производство металлофуллеренов требует последующих процессов экстракции из сажи и сепарации/очистки металлофуллеренов от пустых фуллеренов.

Применяя метод электрической дуги, можно испарять 1) графитовый стержень, предварительно пропитанный раствором, содержащим ионы металлов или 2) полый графитовый стержень с требуемым металлом или оксидом металла.

В нашей лаборатории были синтезированы металлофуллерены методом электродугового разряда. Процедура подготовки графитового электрода с металлическим наполнением проводилась следующим образом: первоначально брался целый графитовый стержень диаметром 6 мм, далее просверливалось отверстие диаметром 2,5 мм вдоль его оси, затем вводился металлический нанопорошок алюминия путем прессования для его заполнения, как видно из рисунка 1.

Рис. 1. Этап подготовки композитного электрода для синтеза металлофуллеренов

Далее полученный электрод помещался в камеру реактора, в котором проводили плазмохимический синтез в атмосфере гелия известным методом дугового распыления. После проведения синтеза, продукты реакции извлекались из камеры – это депозит и сажа, которые изображены на рисунке 2.

Рис. 2. Депозит и сажа сформировавшиеся на композитном электроде графит/Al в результате дугового разряда

На следующем этапе полученный сажевый продукт растворяют в бензоле или толуоле в течение суток. Полученный раствор подвергают фильтрации. Очевидно, что слабовзаимо-

действующие молекулы обладали меньшим временем задержки на фильтре и поэтому проходили сквозь него в первую очередь.

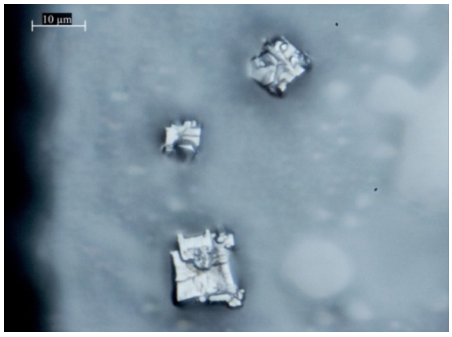
Идентификация сепарированных фуллеренов качественно оценивается по цвету. Различные фуллерены определялись по цвету их раствора в различных растворителях. Например, в толуоле C_{60} дает пурпурный или фиолетовый раствор, в то время как C_{70} окрашивает раствор в красновато-оранжевый цвет [2]. В нашем случае, в результате растворения и фильтрации получалась прозрачная жидкость с оранжевым оттенком, что изображено на рисунке 3.

Рис. 3. Фуллереносодержащий раствор после фильтрации

Выращенные из раствора кристаллы C_{60} (фуллериты), которые формируют различные структуры и формы, получают с 1990-го года. Кроме применения различных условий роста, сообщаются результаты попыток управления формой фуллеритов с использованием матрицы и процесса «drip-and-dry» (капать-и-сушить) [3, 4]. Недавно был продемонстрирован метод осаждения на границе раздела жидкость-жидкость, который давала высокий выход фуллеритовых кристаллов одинаковых размеров. Было показано, что кристаллическая структура таких фуллеритов зависит от растворителя присутствующего при их росте [5]. Этот быстрый и легкий метод позволял получать одномерные монокристаллы фуллеритов высокой чистоты в макроскопических количествах. Однако, требовался полный контроль процесса роста для получения конечного продукта определенного размера и формы. Поэтому понимание механизма роста является фундаментально важной задачей. На сегодняшний день известно, что характеристики фуллеритов определяются концентрацией фуллеренов в растворе, типом растворителя и его соотношением, а также температурой процесса.

В работе [6] представлены результаты по получению симметричных кристаллов фуллеренов в форме цветка из смеси C_{60} и C_{70} в растворе мезитилена/этанола. Главный фактором, определяющий рост подобных кристаллов заключался в различной растворимости C_{60} и C_{70}, которая приводила к двухстадийному росту: сначала C_{70} формирует центр кристалла, а затем C_{60}-C_{70}сокристаллизуются в форме лепестков.

В нашей работе также был применен упрощенный метод «drip-and-dry». Для точного количественного анализа полученный после фильтрации раствор фуллеренов в толуоле наносился на кремниевые и стеклянные подложки и подвергался сушке при комнатной температуре. На снимке 4 представлены соответственно оптическая микрофотография (слева) и СЭМ изображение фуллеритовых частиц (справа), которые образовались в результате высыхания и кристаллизации раствора.



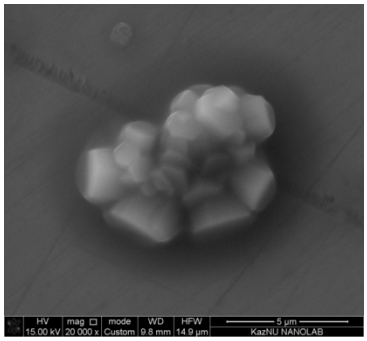


Рис. 4. Оптическая микрофотография фуллеритовых кристаллов (слева), СЭМ изображение фуллеритового кристалла на Si (справа)

Как видно из снимков, полученные фуллериты имеют разнообразную форму, что можно объяснить преобладанием C_{60} или C_{70} в составе молекулярных кристаллов.

Кроме того, для изучения элементного анализа данные кристаллы были изучены Методом *энергодисперсионной* рентгеновской *спектроскопии* (EDX). На рисунке 5 показано, что фуллеритовая частица, помимо углерода и кислорода, содержит 2 ат.% алюминия. Однако, важно отметить, что для точной идентификации эндоэдральных металлофуллеренов требуется более тщательный анализ, в частности, применение жидкостной хроматографии и масс-спектрометрии.

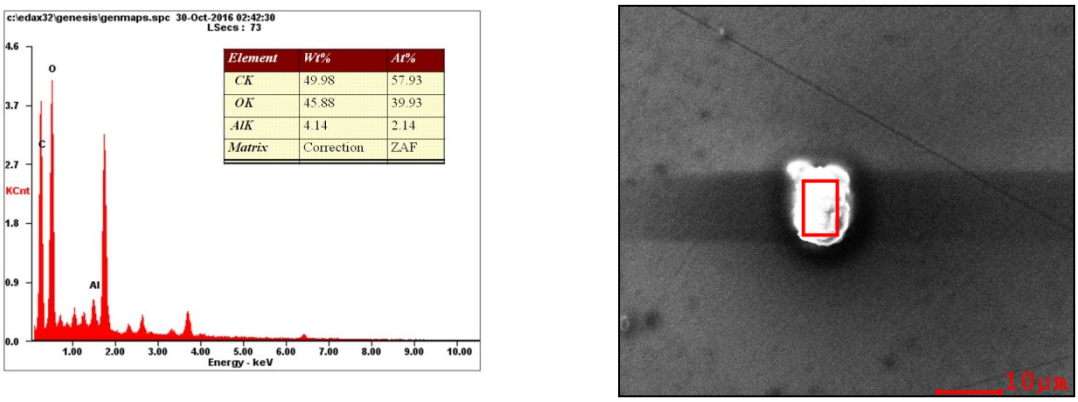


Рис.5. Результат элементного анализа полученных фуллеритовых кристаллитов

Для определения кристаллического состава, фуллеритовые частицы были изучены методом Рамановской спектроскопии. На рисунке 6 представлен типичный спектр, который был получен при возбуждении лазером с длиной волны 473 нм. Для предотвращения разрушения структуры исследуемого материала, применялся ND фильтр, который позволил уменьшить интенсивность лазера до значения мощности 0,35 мВт (1% от исходного значения).

Анализ наиболее интенсивных пиков полученных спектров показал, что частицы представляют собой комбинированный кристалл, состоящий из C_{60} и C_{70}, с преобладанием C_{70}. Пики при 260, 488, 770 и 1468 см$^{-1}$ соответствуют характерным рамановским модам молекулы C_{60}. А набор пиков 700, 1064, 1180 и 1230, 1370, 1446, 1515 и 1564 относится к фуллерену C_{70} [7].

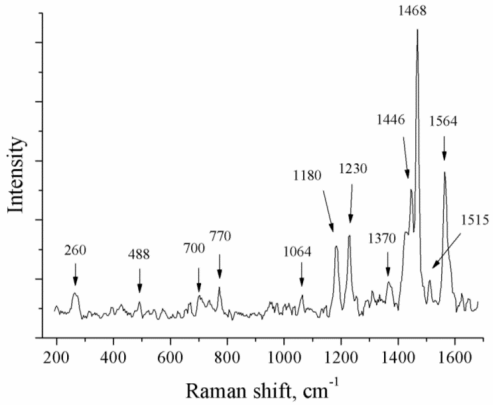


Рис. 6. Типичный Рамановский спектр фуллеритовых кристаллов

Рамановский пик при 1468 см$^{-1}$ смещен относительно табличного значения 1462 см$^{-1}$. Важно отметить, что данный пик соответствует A_g моде сжатия пентагона в С60 считается очень чувствительным к переносу заряда и интермолекулярным соединениям 8-11]. Поэтому наблюдаемое в нашей работе смещение может быть вызвано либо частичной полимеризацией фуллеренов в составе молекулярных кристаллов, либо наличием инородных атомов внутри фуллереновой сферы, т.е. эндофуллеренов.

Данная работа была поддержана Комитетом науки МОН РК в рамках программы ПЦФ0265/2017 г.

Библиографический список

1.A.F. Hebard, M.J. Rosseinsky, R.C. Haddon, D.W. Murphy, S.H. Glarum, T.T.M. Paltsra, A.P. Ramirez, A.R. Kortan. Nature .350, 660.
2. Lu X., Echegoyen L., Balch A.L., Nagase S., Akasaka T. Endohedral Metallofullerenes: Basics and Applications. CRC Press, 2014. P.281.
3.Amer M.S. Raman Spectroscopy, Fullerenes and Nanotechnology. - Royal Society of Chemistry, 2010. P. 287.
4. Liu H., Li Y., Jiang L., Luo H., Xiao S., Fang H., Li H., Zhu D., Yu D., Xu J. and Xiang B. Imaging As-Grown [60]Fullerene Nanotubes by Template Technique // Journal of the American Chemical Society. 2002. Vol. 124.P. 13370–13371.
5.Gan H., Liu H., Li Y., Gan L., Jiang L., Jiu T., Wang N., He X. and Zhu D. Fabrication of fullerene nanotube arrays using a template technique // Carbon. 2005. Vol.43. P.205–208.
6. Minato J. and Miyazawa K. Solvated structure of C60 nanowhiskers // Carbon. 2005. Vol.43. P.2837-2841.
10. Kim J. et al. Unique Crystallization of Fullerenes: Fullerene Flowers // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. A32205.
7.Kimbrell J., Crittenden Chritopher M., Steward Walter J., Khan Farooq A., Anne C. Analysis of mixtures of C60 and C70 by Raman spectrometry // Nanoscience Methods. 2014. P. 40-46.
8.Wagberg T., Persson P.A., Sundqvist B. Structural evolution of low-pressure polymerised C-60 with polymerisation conditions // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 1999. Vol.60. P.1989–1994.
9.Wagberg T., Jacobsson P., Sundqvist B. Comparative Raman study of photopolymerized and pressure-polymerized C-60 films // Phys. Rev. B. – 1999. –Vol. 60 – P. 4535–4538.
10.Davydov V.A., Kashevarova L.S., Rakhmanina A.V., Senyavin V.M., Ceolin R., Szwarc H., Allouchi H., Agafonov V. Spectroscopic study of pressure-polymerized phases of C-60 // Phys. Rev. B. 2000. Vol.61.P.11936–11945.
11.Haddon R.C., Hebard A.F., Rosseinsky M.J., Murphy D.W., Duclos S.J., Lyons K.B., Miller B., Rosamilia J.M., Fleming R.M., Kortan A.R. et al. Conducting Films Of C60 And C70 By Alkali-Metal Doping // Nature. 1991. Vol. 350. P. 320–322.

УДК 538.915; ГРНТИ 29.19.31

РАЗРАБОТКА ДВУХКАСКАДНОГО ТОНКОПЛЕНОЧНОГО СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ АМОРФНОГО ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

А.В. Пирюгин, В.Г. Мишустин
Рязанский государственный радиотехнический университет
Россия, Рязань, tailer013013@gmail.com

Аннотация. Данная работа посвящена разработке двухкаскадного тонкопленочного солнечного элемента на основе a-Si:H и a-SiC:H. Построена зонная диаграмма, смоделирована ВАХ и рассчитаны основные параметры разрабатываемого элемента.
Ключевые слова: солнечный элемент, аморфный гидрогенизированный кремний.

DEVELOPING TWO-STAGE THIN-FILM SOLAR CELLS BASED ON AMORPHOUS HYDROGENATED SILICON

A.V. Piryugin, V.G. Mishustin
Ryazan State Radio Engineering University
Ryazan, Russia, tailer013013@gmail.com

Annotation. This work is devoted to the development of a two-stage thin film solar cell based on a-Si:H and a-SiC:H. The band diagram is described, the current-voltage characteristic is simulated and the basic parameters of the developed element are calculate.
Keywords: solar cell, amorphous hydrogenated silicon.

Солнечная энергетика является перспективным направлением для получения электроэнергии и замещения исчерпаемых источников. С каждым годом количество энергии, вырабатываемой солнечными электростанциями, увеличивается на 30 – 50 ГВт (рисунок 1). По данным за 2016 год солнечная энергетика занимает 4 место по производству энергии среди возобновляемых источников [1].

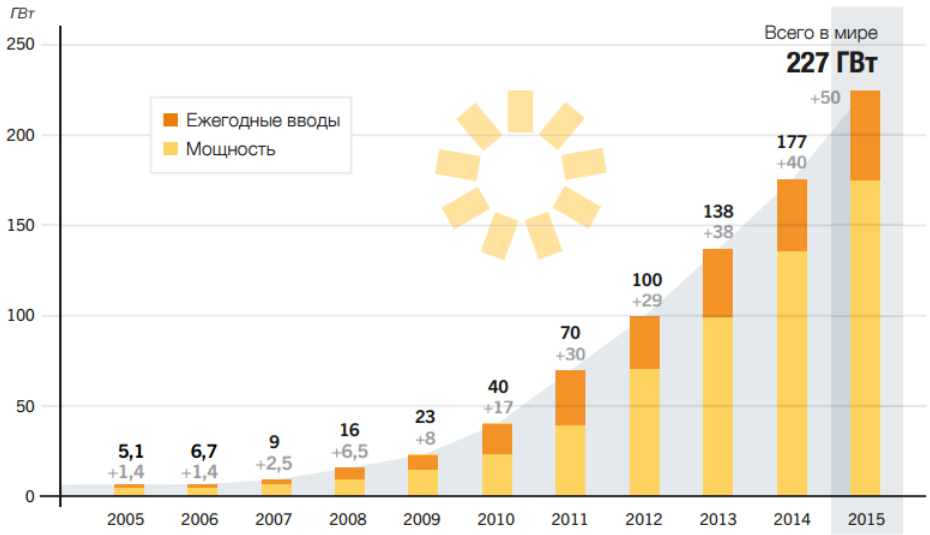


Рис. 1. Вырабатываемая мощность солнечной энергии и ежегодный прирост за 2005-2015 годы [1]

Солнечные элементы – полупроводниковые устройства на основе внутреннего фотоэффекта, которые непосредственно преобразуют солнечную энергию в постоянный электрический ток. Существует несколько основных типов солнечных элементов. Одними из наиболее распространенных типов и перспективных в точки зрения соотношения цена/качество являются многокаскадные солнечные элементы, изготовленные по тонкопленочной технологии, а также солнечные элементы, сочетающие в себе технологии тонкоплёночных и кристаллических полупроводников. Например, по данным на сентябрь 2016 года максимальная эффективность для кремниевых солнечных элементов составляла 26.33% [2], при этом значение теоретического предела – более 30% [3]. Достоинствами тонкопленочных, а также гибридных солнечных элементов на основе кристаллического и некристаллического кремния являются применение низкотемпературных технологических процессов, малый расход полупроводниковых материалов, а также возможности формирования солнечных элементов большой площади [4].

Целью данной работы является разработка двухкаскадного тонкопленочного солнечного элемента на основе a-Si:H и a-SiC:H, обладающего технико-экономическими характеристиками, соответствующими лучшим серийно производимым образцам этого класса солнечных элементов. В качестве активного элемента обоих каскадов была выбрана p-i-n структура (рисунок 2).

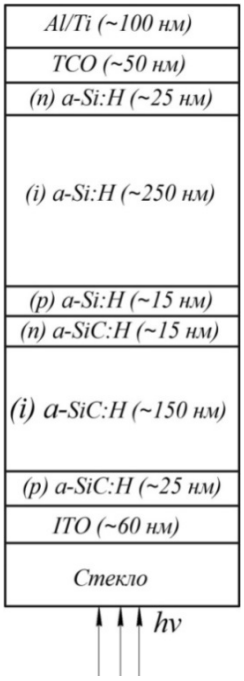


Рис. 2. Пример структуры двухкаскадного солнечного элемента

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исходя из типовых возможностей технологии изготовления тонкопленочных элементов, промоделировать структуру двухкаскадного солнечного элемента.

2. На основе смоделированной структуры солнечного элемента рассчитать вольт-амперные характеристики каждого каскада в отдельности.

3. Проверить работоспособность солнечного элемента при последовательном включении каскадов с помощью программных средств схемотехнического моделирования.

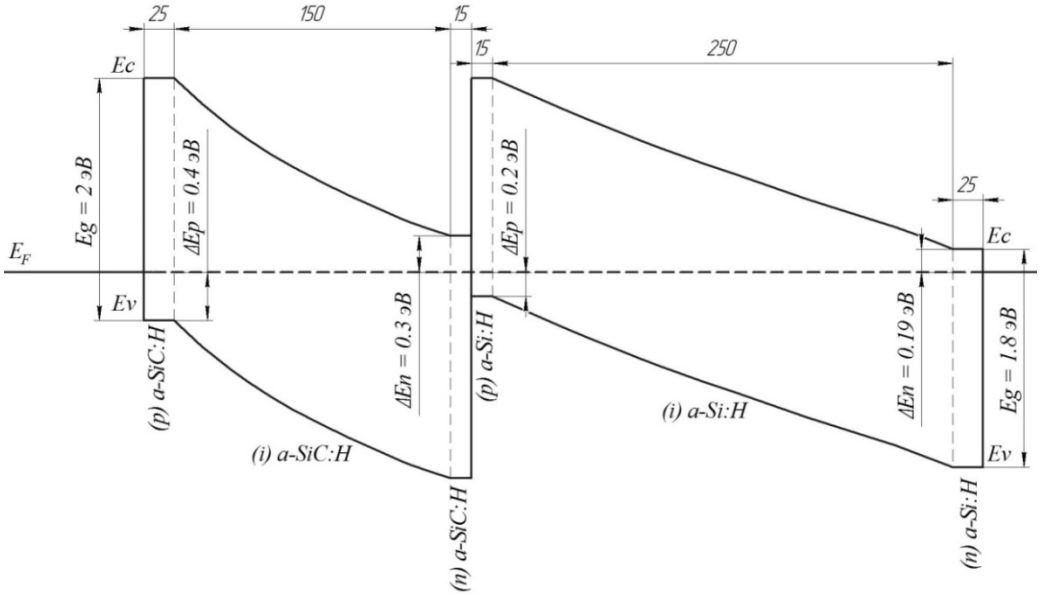


Рис. 3. Зонная диаграмма двухкаскадного солнечного элемента

Наличие высокой плотности состояний в щели подвижности неупорядоченных полупроводников обусловливает характерные особенности при формировании барьерных структур [5]. При решении уравнения Пуассона необходимо учитывать их влияния на пространственное распределение объемного заряда и электрического поля в барьерной структуре [6].

Пример результатов расчета зонной диаграммы двухкаскадного солнечного элемента с p-i-n структурой на основе a-Si:H и a-SiC:H представлен на рисунке 3 [7].

Для того чтобы получить вольт-амперную характеристику солнечного элемента в целом, необходимо было проанализировать ВАХ отдельных p-i-n структур, составляющих

верхний и нижний каскады, с учетом особенностей токопереноса в барьерных структурах на неупорядоченных полупроводниках [8]. Для описания ВАХ использовалось следующие выражение:

$$J = J_S \cdot \left(e^{\frac{e \cdot U}{n \cdot k \cdot T}} - 1\right) - J_ф, \quad (1)$$

где $n = 2$ – коэффициент неидеальности; $J_ф = J_{к.з.}$ – плотность фототока, J_S – плотность тока насыщения (в расчетах принимались следующие значения подвижности носителей: $\mu_n = 20\ (\frac{см^2}{В \cdot с})$, $\mu_p = 2\ (\frac{см^2}{В \cdot с})$ [5]).

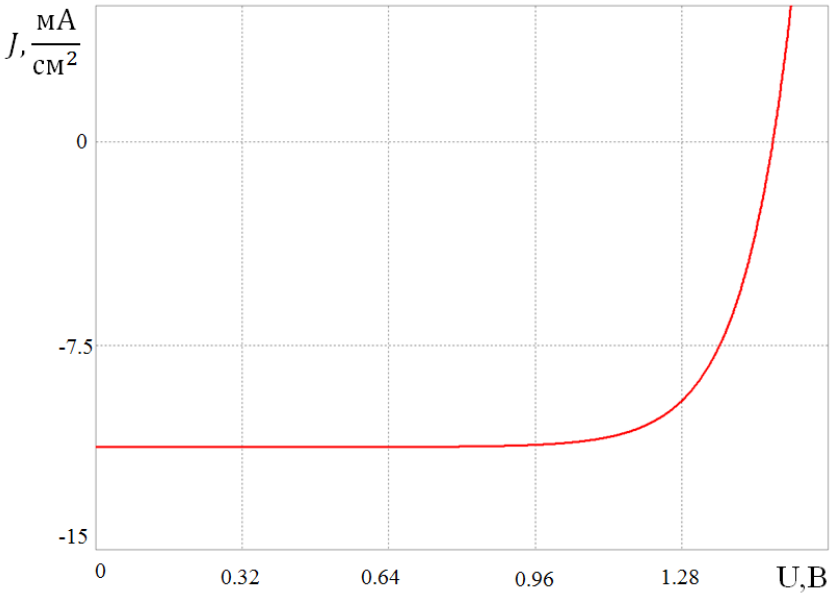


Рис. 4. ВАХ двухкаскадного солнечного элемента с p-i-n структурой на основе a-Si:H и a-SiC:H [7]

На основе расчетов ВАХ, полученных для p-i-n структур верхнего и нижнего каскадов, была смоделирована ВАХ двухкаскадного солнечного элемента (рисунок 4).

По результатам моделирования вольт-амперной характеристики были получены следующие параметры солнечного элемента:

– максимальная генерируемая плотность тока jКЗ = 11.2 мА/см2;
– напряжение холостого хода UXX = 1.48 В;
– коэффициент заполнения ВАХ FF = 0.853;
– коэффициент полезного действия η = 14.13%.

Для проверки результатов теоретических расчетов параметров двухкаскадного солнечного элемента была промоделирована его работа в различных режимах с помощью пакета прикладных программ схемотехнического моделирования MicroCap. Для этого двухкаскадный солнечный элемент был заменен эквивалентной схемой, состоящей из последовательно включенных схем замещения верхнего (a-SiC:H) и нижнего (a-Si:H) каскадов (рисунок 5). Характеристики p-i-n структур верхнего и нижнего каскадов заложены в параметры соответствующих схем замещения. Моделирование в среде MicroCap подтвердило результаты, полученные при теоретических расчетах двухкаскадного солнечного элемента на основе a-Si:H и a-SiC:H с применением математического аппарата, разработанного для барьерных структур на основе неупорядоченных полупроводниках [9]. Также полученные результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными для тестовых образцов аналогичных двухкаскадных солнечных элементов [10]. Несколько завышенные результаты по отношению к характеристикам серийно производимых солнечных элементов объясняются тем, что при сборке в модули неизбежны потери из-за «затенения» поверхности контактной сеткой, большим количеством соединений между элементами, ухудшением характеристик полупроводниковых материалов и структур при работе с элементами большой площади и т.д.

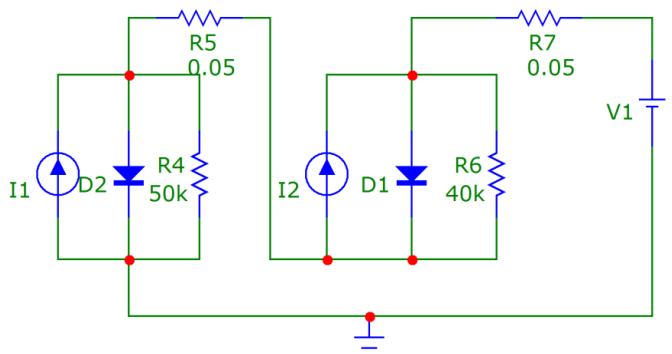


Рис. 5. Эквивалентная схема замещения двухкаскадного солнечного элемента с p-i-n структурой на основе a-Si:H и a-SiC:H

Таким образом, разработка и серийное производство двухкаскадных тонкопленочных элементов на основе неупорядоченных полупроводников является целесообразным направлением развития данного направления солнечной энергетики с точки зрения соотношения стоимости фотоэлектрических модулей и их эффективности. Дальнейшая работа по подбору применяемых материалов и оптимизации структуры солнечных элементов позволить улучшить их технико-экономические характеристики.

Работа выполнена с использованием оборудования РЦЗМкп РГРТУ.

Библиографический список

1. REN21. Renewables 2016 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat (2016).
2. S. Saomoto, World's Highest Conversion Efficiency of 26.33% Achieved in a Crystalline Silicon Solar Cell, 2016. http://www.kaneka.co.jp /kaneka-e/images/topics/1473811995/1473811995_101.pdf.
3. F.H. Alharbi, S. Kais, Theoretical limits of photovoltaics efficiency and possible improvements by intuitive approaches learned from photosynthesis and quantum coherence, Renew. Sustain. Energy Rev. 43 (2015) 1073–1089. doi:10.1016/j.rser.2014.11.101.
4. Вербицкий В.Н., Бобыль А.В., Богданов Д.А., Теруков Е.И. Сравнительный мониторинг кремниевых фотоэлектрических преобразователей // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сб. тр. Междунар. конф. 4 – 7 июля 2016 г. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. С. 275 – 277.
5. С.П. Вихров, Н.В. Вишняков, В.Г. Мишустин Физические процессы в барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников: учебное пособие. Саратов: Вузовское образование, 2005. - 75 с.
6. S.P. Vikhrov, N.V. Vishnyakov, V.G. Mishustin et al. Speciality of Poisson equation solution and calculation of barrier profile on the interface to non-crystalline semiconductor // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2003. Vol. 5. No. 5. P. 1249 – 1254.
7. А.В. Пирюгин, В.Г. Мишустин Расчет двухкаскадного тонкопленочного солнечного элемента с p-i-n структурой на основе a-Si:H и a-SiC:H // Межвуз. сб. науч. Тр. «Физика полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства». Рязань: РГРТУ, 2016. С. 31 – 35.
8. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г. и др. Токоперенос через барьер на контакте металл - некристаллический полупроводник: особенности расчета прямых и обратных ВАХ // Вестник РГРТУ. Вып. 22. Рязань, РГРТУ. 2007. С. 86 – 88.
9. А.В. Алпатов, С.А. Кострюков, В.Г. Мишустин и др. Исследование контактных явлений в фотоэлектрических датчиках на основе наноструктурированных неупорядоченных полупроводников // Вестник РГРТУ. Вып. 30. Рязань, РГРТУ. 2009. С. 58 – 62.
10. Афанасьев В.П., Теруков Е.И., Шерченков А.А. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. 2-е изд. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 168 с.

СЕКЦИЯ «СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ»

УДК 004.89; ГРНТИ 27.41.41

ОПТИМАЛЬНОЕ ЧИСЛО КОНВЕРГИРУЕМЫХ ПОКОЛЕНИЙ И ПОЛЕЗНЫХ ОСОБЕЙ ПРИ ВАРЬИРУЮЩИХСЯ ЗНАЧЕНИЯХ ВЕРОЯТНОСТИ МУТАЦИИ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА НА МАЛЫХ ПРОСТРАНСТВАХ ПОИСКА

А. Сапрыкин, К. Акинина, Е. Сапрыкина
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, saprykin.a.n@cnit.rsreu.ru

Аннотация. В данной работе рассматривается влияние числа конвергируемых поколений и полезных особей при различных значениях вероятности мутации классического генетического алгоритма на малых поисковых пространствах.

Ключевые слова: генетические алгоритмы, оптимизация многоэкстремальных функций, задачи оптимизации, число поколений генетического алгоритм, вероятность мутации, число полезных особей

THE OPTIMAL NUMBER OF GENERATIONS TO CONVERGE AND USEFUL SPECIMENS UNDER VARIABLE VALUES OF MUTATION PROBABILITIES OF THE GENETIC ALGORITHM AT SMALL SEARCH SPACES

A. Saprykin, K. Akinina, E. Saprykina
Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, saprykin.a.n@cnit.rsreu.ru

Abstract. This paper explores the effect of the number of generations for converging and useful individuals at different values of the mutation probability of the classic genetic algorithm at small search spaces.

Keywords: genetic algorithms, optimization of simple multiextremal functions, optimization problem, the number of generations in the genetic algorithm, mutation probability, useful number of individuals

Генетические алгоритмы являются адаптивными эвристическими рандомизированными методами поиска и представляют собой подсемейство эволюционных алгоритмов, которые имитируют биологическую эволюцию и руководствуются принципами естественного отбора. Основные принципы работы генетического алгоритма были представлены в работе [3]. Эффективность применения генетических алгоритмов для решения различных задач оптимизации была доказана в работах [1, 4].

Основной задачей генетических алгоритмов является создание новых особей, обладающих необходимыми характеристиками, путем использования операций скрещивания и мутации. Мутация является одним из самых важных этапов выполнения генетического алгоритма, вследствие того, что она влияет на скорость нахождения глобального экстремума, и позволяет предотвратить локальные преждевременные конвергенции.

Другими важными параметрами генетического алгоритма являются размер конвергируемых поколений и количество особей в очередной популяции. Указанные параметры непосредственно влияют на точность и время работы генетического алгоритма, однако, в научном сообществе на данный момент не существует консенсуса по поводу их оптимальных значений [2].

Целью данного исследования является определение оптимального значения вероятности мутации генетического алгоритма на малых пространствах поиска, а также числа полезных особей и конвергируемых поколений.

В качестве примера в данной работе рассматривается задача нахождения максимального значения простых трехэкстремальных функций по оси ординат. Все вычисления проводятся в ограниченном пространстве поиска (от -128 до +128 условных единиц по оси абсцисс). Ограничение размера поискового пространства приводит к уменьшению размера хромосомы и, как следствие, уменьшению времени работы генетического алгоритма.

На первом этапе устанавливается взаимосвязь между оптимальным размером популяции (под оптимальным мы имеем в виду размер, который вызывает максимально быструю конвергенцию) и максимальным числом поколений, при котором происходит увеличение значения целевой функции. На втором этапе рассмотренные параметры подвергаются влиянию параметра мутации с различными значениями вероятности.

В данной работе использовался классический генетический алгоритм со следующими заданными неизменными параметрами: стратегия элитизма, одноточечный кроссовер, вероятность скрещивания – 90%. На первом этапе процент мутации составил 5%. Вначале была проведена серия экспериментов для числа поколений, равного 5, и далее их число увеличивалось до тех пор, пока глобальный экстремум не находился в абсолютном большинстве экспериментов серии. В каждой серии экспериментов размер популяции варьировался от 2 до 16 особей. Для каждого набора переменных эксперимент проводился 10 раз с целью повышения точности исследования с учетом рандомизированной природы поиска генетического алгоритма.

Числовые результаты, полученные в ходе проведенных экспериментов первого этапа, представлены в таблицах 1-4.

Таблица 1 - Значения функции полезности (у.е.) по сериям экспериментов (число поколений: 5)

№ эксперимента	$N_{экс}$ 1	$N_{экс}$ 2	$N_{экс}$ 3	$N_{экс}$ 4	$N_{экс}$ 5	$N_{экс}$ 6	$N_{экс}$ 7	$N_{экс}$ 8	$N_{экс}$ 9	$N_{экс}$ 10
Размер популяции: 2 особи	4	-446	2	4	-14	-124	-124	-446	4	2
Размер популяции: 4 особи	4	-124	4	4	-14	4	2	4	-124	4
Размер популяции: 8 особей	2	4	2	4	-124	4	4	-24	4	4
Размер популяции: 16 особей	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Таблица 2 - Значения функции полезности (у.е.) по сериям экспериментов (число поколений: 10)

№ эксперимента	$N_{экс}$ 1	$N_{экс}$ 2	$N_{экс}$ 3	$N_{экс}$ 4	$N_{экс}$ 5	$N_{экс}$ 6	$N_{экс}$ 7	$N_{экс}$ 8	$N_{экс}$ 9	$N_{экс}$ 10
Размер популяции: 2 особи	4	2	2	-14	-446	4	4	2	-14	-124
Размер популяции: 4 особи	4	2	-14	4	2	-14	-124	2	2	-14
Размер популяции: 8 особей	4	4	4	4	4	2	4	4	2	4
Размер популяции: 16 особей	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Таблица 3 - Значения функции полезности (у.е.) по сериям экспериментов (число поколений: 20)

№ эксперимента	$N_{экс}$ 1	$N_{экс}$ 2	$N_{экс}$ 3	$N_{экс}$ 4	$N_{экс}$ 5	$N_{экс}$ 6	$N_{экс}$ 7	$N_{экс}$ 8	$N_{экс}$ 9	$N_{экс}$ 10
Размер популяции: 2 особи	4	4	4	-446	4	-14	4	-14	-14	4
Размер популяции: 4 особи	0	4	0	4	2	4	-4	2	4	-124
Размер популяции: 8 особей	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0
Размер популяции: 16 особей	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Таблица 4 - Значения функции полезности (у.е.) по сериям экспериментов (число поколений: 40)

№ эксперимента	$N_{экс}$ 1	$N_{экс}$ 2	$N_{экс}$ 3	$N_{экс}$ 4	$N_{экс}$ 5	$N_{экс}$ 6	$N_{экс}$ 7	$N_{экс}$ 8	$N_{экс}$ 9	$N_{экс}$ 10
Размер популяции: 2 особи	4	4	2	-14	-124	4	-124	4	-128	2
Размер популяции: 4 особи	4	4	-4	4	4	4	4	4	-124	-14
Размер популяции: 8 особей	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4
Размер популяции: 16 особей	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Согласно проведенным экспериментам, максимальное значение исследуемых функций достигается при значении оси ординат равном 4 (данное значение соответствует гло-

бальным экстремумам исследуемых функций). Вычислим среднее значение функции полезности для каждой серии экспериментов с одинаковым количеством поколений и особей в популяции и для наглядности предоставим полученные результаты в графической форме на рисунке 1.

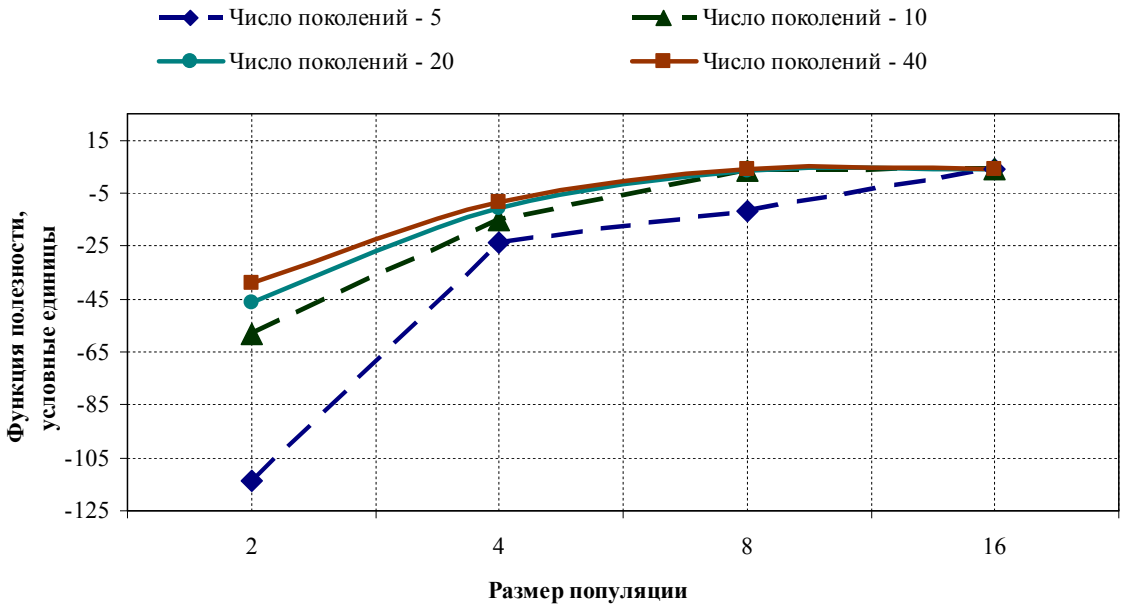


Рис. 1. Зависимость функции полезности от числа поколений и особей в популяции

Согласно представленному на рисунке 1 графику, существует зависимость между размером популяции и числом конвергируемых поколений в генетическом алгоритме. При минимальном размере популяции значения функции полезности также находятся на минимальном уровне, а глобальный экстремум достигается менее чем в половине всех экспериментов (таблицы 1-4). При значении популяции, равном 4, значения функции полезности значительно улучшаются, но все еще не являются оптимальными. При значении популяции, равном 8, глобальный экстремум достигается в ~90% проведенных экспериментов, однако наилучшие результаты были показаны при значении популяции, равном 16 (100% вероятность достижения глобального экстремума).

При числе конвергируемых поколений, равном 5, результаты экспериментов оказываются разбросаны слишком широко, что приводит к неудовлетворительным значениям функции полезности при размере популяции меньше 16.

На втором этапе генетический алгоритм использует полученные на первом этапе квазиоптимальные значения числа поколений и особей в популяции, устанавливается взаимосвязь между ними и варьируемым значением параметра мутации. Процент мутации изменялся от 1% до 25%. Вначале была проведена серия экспериментов для параметра мутации, равного 1%, затем он увеличивался следующим образом: 5%, 10%, 25%.

Числовые результаты, полученные в ходе проведенных экспериментов второго этапа, представлены в таблицах 5-7.

Таблица 5 - Значения функции полезности (у.е.) по сериям экспериментов (вероятность мутации: 1%)

№ эксперимента	$N_{экс}$ 1	$N_{экс}$ 2	$N_{экс}$ 3	$N_{экс}$ 4	$N_{экс}$ 5	$N_{экс}$ 6	$N_{экс}$ 7	$N_{экс}$ 8	$N_{экс}$ 9	$N_{экс}$ 10
Максимальное число поколений: 20										
Размер популяции: 8 особей	4	4	4	4	-124	4	4	4	-14	4
Размер популяции: 16 особей	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Максимальное число поколений: 40										
Размер популяции: 8 особей	4	4	4	4	-14	4	-14	4	4	4
Размер популяции: 16 особей	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Значения функции полезности, полученные в серии экспериментов для значения вероятности мутации, равного 5%, отображены в табл. 3-4.

Таблица 6 - Значения функции полезности (у.е.) по сериям экспериментов (вероятность мутации: 10%)

№ эксперимента	$N_{экс}$ 1	$N_{экс}$ 2	$N_{экс}$ 3	$N_{экс}$ 4	$N_{экс}$ 5	$N_{экс}$ 6	$N_{экс}$ 7	$N_{экс}$ 8	$N_{экс}$ 9	$N_{экс}$ 10
Максимальное число поколений: 20										
Размер популяции: 8 особей	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Размер популяции: 16 особей	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Максимальное число поколений: 40										
Размер популяции: 8 особей	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Размер популяции: 16 особей	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Таблица 7 - Значения функции полезности (у.е.) по сериям экспериментов (вероятность мутации: 25%)

№ эксперимента	$N_{экс}$ 1	$N_{экс}$ 2	$N_{экс}$ 3	$N_{экс}$ 4	$N_{экс}$ 5	$N_{экс}$ 6	$N_{экс}$ 7	$N_{экс}$ 8	$N_{экс}$ 9	$N_{экс}$ 10
Максимальное число поколений: 20										
Размер популяции: 8 особей	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Размер популяции: 16 особей	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Максимальное число поколений: 40										
Размер популяции: 8 особей	4	-14	4	4	4	4	-14	4	4	2
Размер популяции: 16 особей	4	4	4	4	4	2	4	4	2	4

В большинстве проведенных экспериментов второго этапа максимальное значение функции полезности равнялось 4, минимальное равнялось -124. Максимальное значение было принято за 100% полезности, минимальное – за 0%; данные значения использовались для визуализации полученных результатов (рис. 2-3). Для построения диаграмм были использованы следующие значения: 8 особей, 20 и 40 поколений. Результаты экспериментов для 16 особей не визуализировались вследствие того, что результаты, полученные при данном значении, практически всегда приводили к оптимальному результату.

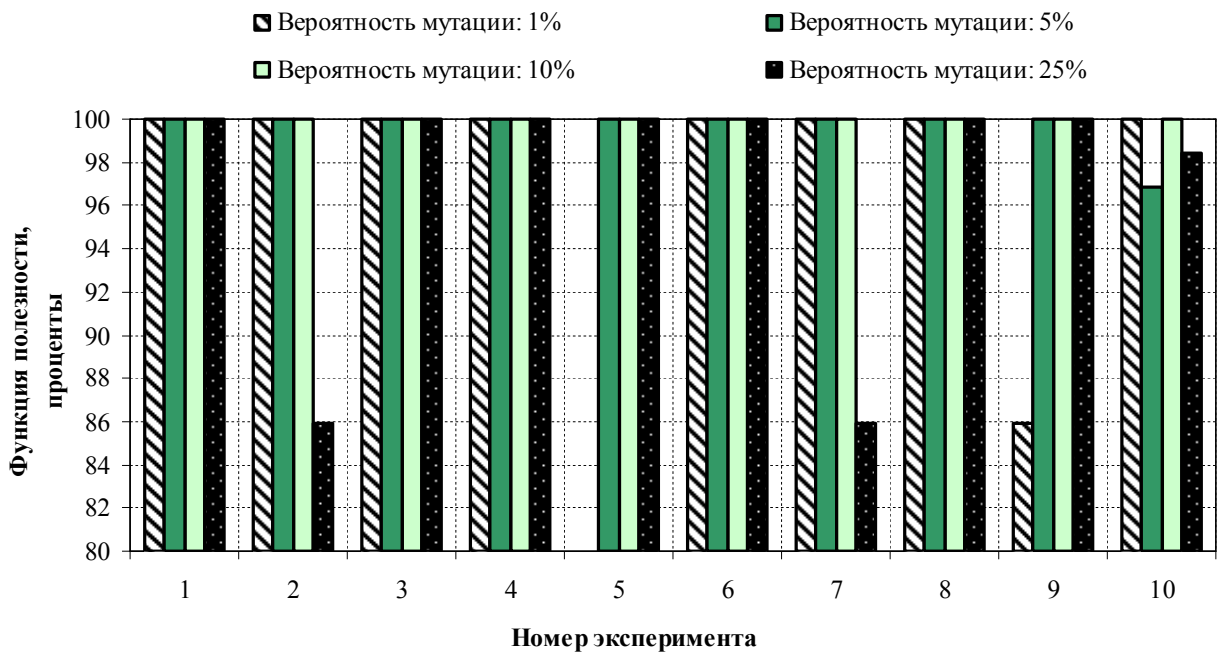


Рис. 2. Зависимость функции полезности от вероятности мутации при оптимальных параметрах числа поколений и числа особей в популяции (8 особей, 20 поколений)

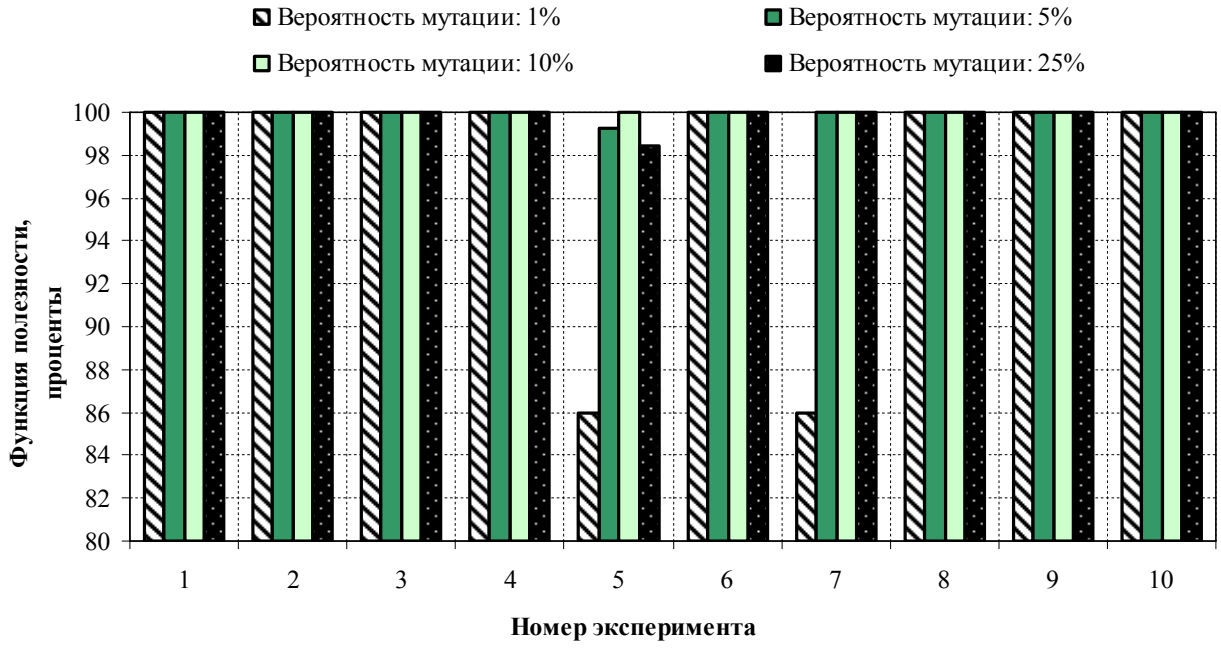


Рис. 3. Зависимость функции полезности от вероятности мутации при оптимальных параметрах числа поколений и числа особей в популяции (8 особей, 40 поколений)

Согласно данным, представленным на рисунках 2-3, оптимальное значение параметра мутации находится в диапазоне 5-10%. При слишком низком или слишком высоком проценте мутации отклонения могут достигать ~5%-20%, а в некоторых случаях выбор таких параметров может привести к значительному уменьшению или отсутствию сходимости.

Слишком низкая вероятность мутации не позволяет алгоритму выйти за границы локальных экстремумов оптимизационной функции, а слишком высокая к тому же снижает сходимость алгоритма и сводит его к случайному поиску. Было отмечено, что максимальное отклонение функции полезности происходило в пределах 5%, что является критичным для решения задач оптимизации.

Основываясь на полученных результатах можно сделать вывод о том, что правильный выбор значений числа конвергируемых поколений, полезных особей и вероятности мутации генетического алгоритма оптимизации на малых поисковых пространствах является важным условием его быстродействия и гарантирует сходимость генетического алгоритма.

Библиографический список

1. Golberg, D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addion wesley. 1989.
2. Goldberg, D.E. Sizing Populations for Serial and Parallel Genetic Algorithms, Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms. San Mateo, CA: Morgan Kaufman. 1989, pp. 70-79
3. Holland, J. H. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. Cambridge, MA: MIT Press. 1975.
4. Whitley, D. A genetic algorithm tutorial. Statistics and computing. 1994, 4(2), pp. 65-85.

УДК 004.89; ГРНТИ 27.41.41

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ БАЛАНСИРОВКИ НАГРУЗКИ В СЕТЯХ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ДВУХФАЗНУЮ МНОГОКАНАЛЬНУЮ МАРШРУТИЗАЦИЮ

А. Сапрыкин, Е. Сапрыкина
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, saprykin.a.n@cnit.rsreu.ru

Аннотация. В данной работе предлагается генетический алгоритм балансировки нагрузки в сетях центров обработки данных, использующих двухфазную многоканальную маршрутизацию, его основные генетические операторы и особенности их применения.

Ключевые слова: генетические алгоритмы, сети ЦОД, многопутевая маршрутизация, балансировка нагрузки, мутация, функция полезности

GENETIC ALGORITHM FOR LOAD BALANCING IN DATA CENTERS NETWORKS USING TWO-PHASE MULTI-CHANNEL ROUTING

A. Saprykin, E. Saprykina
Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, saprykin.a.n@cnit.rsreu.ru

Abstract. This paper considers a genetic algorithm for load balancing in data center networks using two-phase multipath routing, its main characteristics and genetic operators and features of their application.

Keywords: genetic algorithms, datacenter network, multipath routing, load balancing, mutation, fitness function

Концепция двухфазной маршрутизации была предложена Вэлиантом в 1982 году [4]. Она предполагает маршрутизацию информационного потока от узла отправления до узла назначения с использованием случайного промежуточного узла. Сети с двухфазной маршрутизацией обеспечивают высокую отказоустойчивость. Именно это их свойство в совокупности с высокой производительностью делает их весьма перспективными для использования в сетях дата-центров, что было рассмотрено в работе [1]. Сети с двухфазной маршрутизацией позволяют поддерживать высокую пропускную способность каналов при передаче высокодинамичного трафика, а распределенная передача каждого потока по нескольких параллельным путям дает возможность равномерно сбалансировать нагрузку.

Для решения задачи балансировки нагрузки в сетях центров обработки данных предлагается использовать модифицированный генетический алгоритм, так как стандартными методами данная задача не решается из-за большого числа возможных вариантов реализации соединений.

Генетические алгоритмы являются адаптивными эвристическими рандомизированными методами поиска и представляют собой подсемейство эволюционных алгоритмов, которые имитируют биологическую эволюцию и руководствуются принципами естественного отбора. Основные принципы работы генетического алгоритма были представлены в работе [3]. Эффективность применения генетических алгоритмов для решения различных задач оптимизации была доказана в работах [2, 5].

Основными характеристиками генетического алгоритма являются: способ кодирования хромосом, функция создания начальной популяции, размер популяции, генетические операторы мутации и скрещивания, функция полезности, оператор отбора в новое поколение, критерии завершения работы алгоритма.

Рассмотрим основные этапы генетического алгоритма балансировки нагрузки в сетях центров обработки данных.

Этап 1. Создание начальной популяции. На данном этапе случайным образом формируются заданное количество особей базовой популяции. Принцип рандомизированности используется с целью равномерного распределения особей в пространстве поиска, что позволяет добиться генетического разнообразия.

Особь представляет собой одну или несколько хромосом, содержащих закодированные параметры. Существует несколько способов кодирования хромосом: дискретное, вещественное, порядковое и древообразное. Вне зависимости от способа кодирования параметры

хромосомы представляются как в десятичной, так и в двоичной системе счисления. В научном сообществе наиболее распространено представление хромосомы в виде двоичного кода.

В данной работе каждая особь представляет собой набор хромосом, каждая из которых соответствует отдельному входящему сетевому потоку. При распределении входного потока сети между двумя промежуточными узлами (в данной работе информационный поток сети делится на 2 части) хромосома представляет собой следующий набор элементов, записанных последовательно друг за другом: балансировочный параметр, промежуточный узел для первой части потока и промежуточный узел для второй части потока.

Балансировочный параметр показывает, какая часть потока (в процентах) будет проходить через первый промежуточный узел. Остальная часть потока определяется автоматически, как разница между 100% и значением указанного балансировочного параметра, и проходит через второй промежуточный узел. На кодирование балансировочного параметра отводится 7 бит. Для предотвращения появления запрещенных хромосом, содержащих несуществующие номера промежуточных узлов, число бит, отводимых для их кодирования варьирует в зависимости от числа узлов в сети (не более 128) и принимает значения от 3 до 7 бит. Пример кодирования хромосомы представлен на рисунке 1.

Рис. 1. Пример кодирования хромосомы

Этап 2. Реконфигурация запрещенных групп генов в хромосомах. Гены в хромосоме объединяются в группы, каждая из которых отвечает за определенный признак: балансировочный параметр, номер промежуточного узла для первой части потока, номер промежуточного узла для второй части потока. В ситуациях, когда число бит, отводимых под какой-либо параметр хромосомы, позволяет закодировать в себе большее число узлов, чем присутствует в сети, возникают запрещенные группы генов. Так как генетическому алгоритму для начала работы требуется начальная популяция жизнеспособных особей, то необходимо проверить все созданные на первом этапе особи на наличие запрещенных групп генов. При обнаружении они подвергаются реконфигурации.

Этап 3. Расчет функции полезности особей. Функция полезности определяет загрузку всех каналов сети и налагает штрафы за увеличение загрузки отдельных каналов. Рассматриваемый алгоритм использует статические штрафы и для каждого интервала загрузки канала определяет соответствующее ему штрафное значение. Чем больше загружен канал, тем большее значение штрафа ему приписывается. Целью оптимизации сети является минимизация функции (1):

$$f(x) = \sum_{i=1}^{m} R\left(c_i(x)\right), \tag{1}$$

где m – число каналов в сети, $c_i(x)$ – величина загрузки i-го канала, $R(c_i(x))$ – налагаемый штраф.

Этап 4. Селекция особей для создания новой популяции. Отбор в новое поколение может осуществляться 3 способами: турнирный отбор, элитарный отбор и отбор усечением. При турнирном отборе из популяции случайным образом выбираются 2 особи, наиболее приспособленная из которых отбирается и допускается к скрещиванию, а вторая отбрасывается. Турнирный отбор избавляет от необходимости расчета функции полезности для каждой особи и сортировки особей в популяции. При элитарном отборе определяется наилучшая

особь и задается число ее копий, которые обязательно включаются сразу в следующее поколение. Данный способ отбора особей позволяет сохранить хорошие промежуточные решения в популяции и гарантирует сходимость алгоритма. При отборе усечением сначала проводится сортировка особей в зависимости от значения функции полезности, а затем производится отбрасывание особей, имеющих значения функции полезности меньше заданного значения.

На рисунке 2 показана работа рассматриваемых способов отбора.

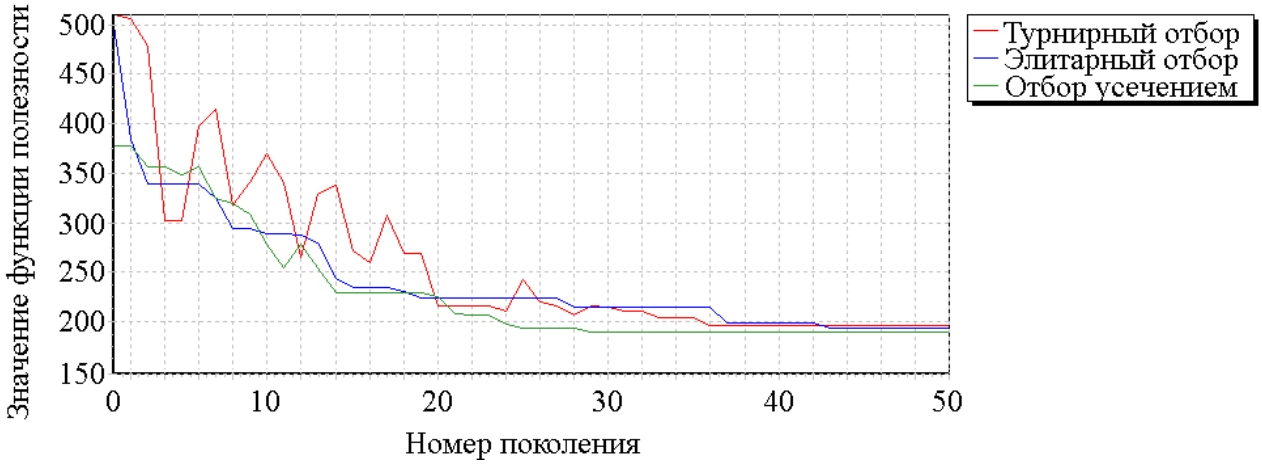


Рис. 2. Зависимость функции полезности от способа отбора

График функции полезности при использовании турнирного отбора в основном состоит из скачкообразных пиков, что обусловлено большим количеством запрещенных хромосом и случайным выбором особей для сравнения, однако вероятность нахождения глобального экстремума выше, чем при использовании других способов отбора. Отбор усечением также содержит пики, но они гораздо ниже, чем при использовании турнирного отбора. При элитарном отборе график функции полезности снижается более плавно, что происходит в следствии того, что наилучшее промежуточное решение всегда остается в популяции.

Этап 5. Применение генетических операторов скрещивания и мутации. На данном этапе отобранные особи подвергаются скрещиванию и мутации. Оператор скрещивания позволяет потомку унаследовать гены обоих родителей. В алгоритме применяется одноточечное скрещивание, суть которого состоит в том, что у двух родительских особей задается точка разрыва и потомок наследует генетический материал одного родителя до заданной точки и генетический материал другого родителя после нее. После завершения операции скрещивания полученная особь повергается мутации. Данный оператор в случайном порядке с заданной вероятностью изменяет отдельные гены. Использование мутации позволяет выводить алгоритм из возможных «тупиковых» ситуаций. В ходе скрещивания и мутации существует вероятность появления запрещенных групп генов.

Этап 6. Создание новой популяции. На данном этапе полученные потомки популяции-родителей используются для формирования нового поколения.

Этап 7. Повторение этапов 2-6 до получения квазиоптимальных результатов.

Библиографический список

1. Сапрыкина, Е.Н. Использование двухфазной многоканальной маршрутизации в сетях дата-центров / Е.Н. Сапрыкина, А.Н. Сапрыкин // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань: РГРТУ, 2016. – С. 337–338.
2. Golberg, D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addion wesley. 1989.
3. Holland, J. H. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. Cambridge, MA: MIT Press. 1975.
4. Valiant L.G. A scheme for fast parallel communication // SIAM Journal on Computing, 1982. Vol. 11, No. 2. P. 350–361.
5. Whitley, D. A genetic algorithm tutorial. Statistics and computing. 1994, 4(2), pp. 65–85.

УДК 004.21; ГРНТИ 27.41.41

АЛГОРИТМЫ КОМПОНОВКИ КОНСТРУКТИВНЫХ БЛОКОВ ЭВС

К. Акинина, А. Сапрыкин
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, saprykin.a.n@cnit.rsreu.ru

Аннотация. В данной работе рассматриваются современные алгоритмы компоновки конструктивных блоков ЭВС, приводится их классификация, проводится сравнительный анализ рассмотренных алгоритмов.

Ключевые слова: алгоритмы компоновки, блоки ЭВС, конструктивные блоки, эвристические алгоритмы, последовательные алгоритмы, параллельно-последовательные алгоритмы, итерационные алгоритмы, генетические алгоритмы

LAYOUT ALGORITHMS FOR BUILDING BLOCKS OF ELECTRONIC COMPUTING MEANS

K. Akinina, A. Saprykin,
Ryazan State Radio Engineering University,
Russia, Ryazan, saprykin.a.n@cnit.rsreu.ru

Abstract. This paper consideres modern layout algorithms for building blocks of electronic computing means, their classification and a comparative analysis of the proposed algorithms.

Keywords: Layout Algorithms, ECM blocks, building blocks, heuristic algorithms, sequential algorithms, parallel-sequential algorithms, iterative algorithms, genetic algorithms

В настоящее время одним из важнейших этапов конструкторско-технологического проектирования ЭВС с помощью систем автоматизированного проектирования является компоновка типовых конструктивных единиц ЭВС. Она является первым этапом конструкторского проектирования и однозначно соотносит конструктивные и функциональные элементы проектируемого устройства.

Задачи компоновки в большинстве случаев представляют собой процесс принятия решений и в определенных, и в неопределенных условиях. В результате этого процесса происходит объединение конструктивных модулей низшего порядка в более крупные конструктивные модули высшего порядка. Компоновка требует наличия определенных критериев и ограничений.

При решении задачи компоновки в качестве исходных данных выступает коммутационная схема. Для ее решения необходимо перевести коммутационную схему в граф, мультиграф или гиперграф.

Задача компоновки может быть поставлена как задача, состоящая в выделении в графе $G=(X,U)$ частей $G_i=(X_i,U_i)$, $X_i \subseteq X$, $U_i \subseteq U$, $i \in I=\{1,2,\ldots,l\}$, *г*де l – количество частей, на которое граф будет поделен [5]. Данная задача является комбинаторно-логической и только полный перебор всех вариантов разбиения позволяет найти оптимальное решение.

Методы компоновки конструктивных модулей могут быть поделены на две большие группы. Методы первой группы учитывают такие характеристики, как количество элементов в блоках, количество внешних выводов каждого блока и т.д. В качестве критериев используется суммарное число блоков, временные задержки сигналов и т.д. В зависимости от характеристик и критериев, учитываемых методами компоновки, проводится отбор модулей в более крупные блоки. К этой группе методов компоновки относят такие, в которых оптимизация сводится к заданным конструктивным параметрам, описывающим расположение соответствующих элементов и их соединений. Такая группа методов компоновки носит название компоновка конструктивных блоков.

Методы второй группы помимо конструктивных параметров учитывают и функциональные. Основными учитываемыми критериями являются количество типов используемых модулей, количество межмодульных соединений, количество неиспользованных элементов во всех модулях и прочие. Такая группа методов компоновки носит название компоновка типовых блоков.

В данной работе рассматривается методы компоновки первой группы и приводится их классификация (рис. 1).

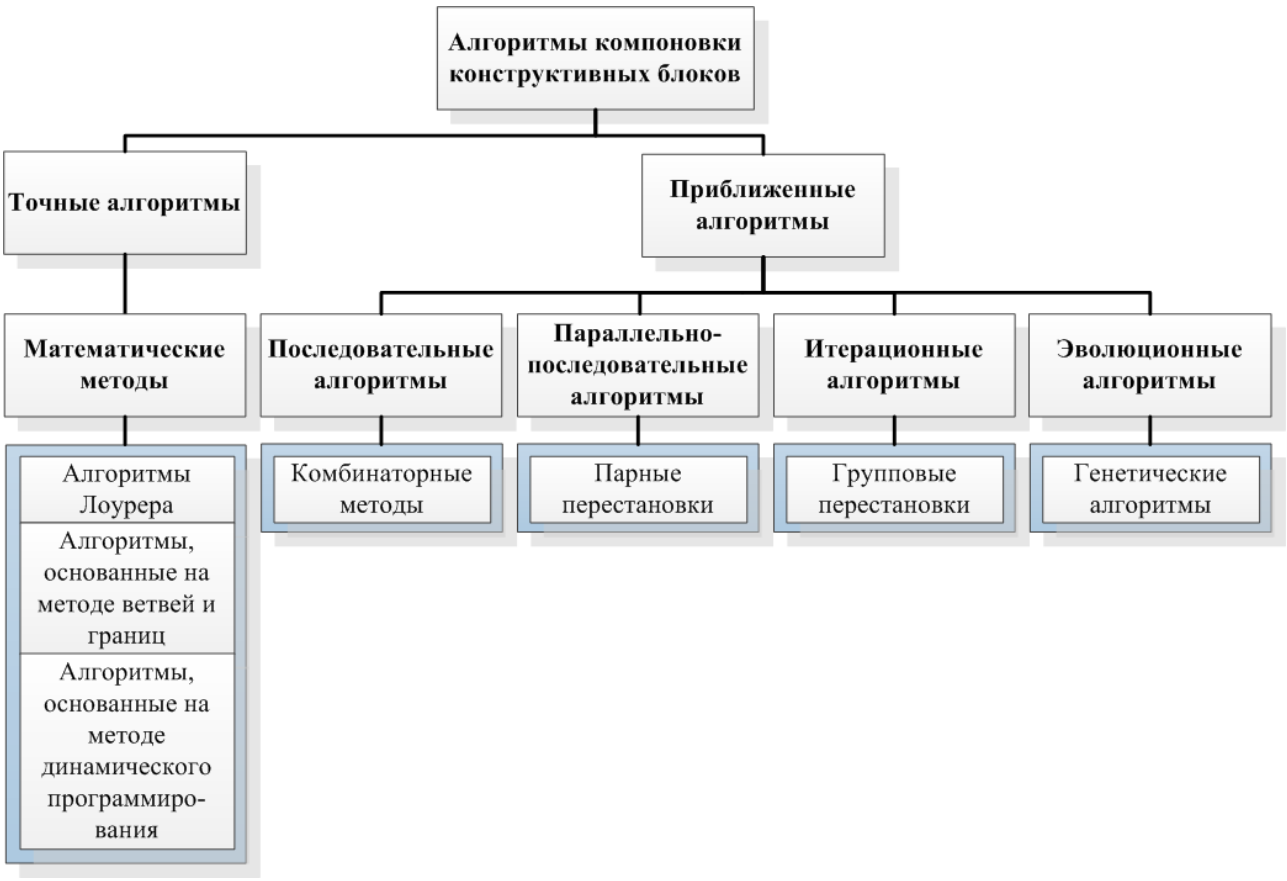


Рис. 1. Классификация алгоритмов компоновки конструктивных блоков ЭВС

К точным алгоритмам относятся алгоритмы, основанные на математических методах. Среди них можно выделить алгоритмы Лоурера, алгоритмы, основанные на методе ветвей и границ и алгоритмы, основанные на методе динамического программирования.

Алгоритмы Лоурера, рассмотренные в [10-11], предлагают процедуру минимизации нормальных форм переключательных функций, однако характеризуются большим объемом вычислений. В качестве математической модели схемы они используют гиперграф.

Алгоритмы, основанные на методе ветвей и границ [1] заключаются в фиксации отмеченных элементов в определенных узлах. Относительно этих элементов рассчитывается расположение остальных элементов, чье оптимальное количество и точное расположение определяется в ходе решения линейной задачи назначения для каждой ветви. В качестве математической модели схемы они используют гиперграф или взвешенный неориентированный граф.

Алгоритмы, основанные на методе динамического программирования делят крупные задачи на более мелкие подзадачи.

В настоящее время максимальное количество переменных, которое может быть обработано вычислительной системой за приемлемое время не превышает 20. Вследствие этого вместо точных алгоритмов нередко используются приближенные алгоритмы.

Приближенные алгоритмы включают в себя последовательные, параллельно-последовательные, итерационные и эволюционные алгоритмы.

В ходе выполнения последовательных алгоритмов элементы, не распределенные ранее элементы последовательно заполняют блоки. Заполняющие блоки элементы выбираются в соответствии с заданным приоритетом, который в первую очередь учитывает их связь с уже присутствующими в блоке элементами.

Параллельно-последовательные алгоритмы сначала с помощью заданных критериев выделяют определенную группу элементов, а затем распределяют их по блокам, учитывая их ограничения. Данный вид алгоритмов отличается более сложной структурой по сравнению с предыдущим видом.

Итерационные алгоритмы используют уже существующие варианты компоновки. Они заданным образом меняют местами элементы разных блоков, тем самым улучшая их. Обмен блоков происходит в соответствии с заданными критериями и ограничениями.

Помимо алгоритмов, описанных выше, широкое распространение получили эволюционные алгоритмы, в частности, генетические алгоритмы [2-4, 6, 7]. С помощью них за определенное число итерация алгоритма можно получить квазиоптимальные результаты, которые будут являться достаточными для большинства практических целей.

Генетические алгоритмы были созданы по аналогии с естественными биологическими процессами отбора. Они являются популярными оптимизационными алгоритмами, нередко используемыми для решения сложных крупномасштабных проблем оптимизации в различных сферах деятельности [8, 9, 12].

Генетические алгоритмы отличаются тем, что в ходе их реализации рассматривается не одно, а сразу несколько потенциальных решений. Такие решения называются особями; они содержат множество закодированных параметров.

Основными характеристиками генетического алгоритма являются: способ кодирования хромосом, функция создания начальной популяции, размер популяции, генетические операторы мутации и скрещивания, функция полезности, оператор отбора в новое поколение, критерии завершения работы алгоритма.

Подготовительный этап к использованию генетического алгоритма включает в себя:

- выделение множества основных параметров (свойств, влияющих на полезность особей) $X = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$;
- оценивание полезности доступных вариантов особей (расчет функции полезности);
- разработка алгоритмы вычисления функции полезности;
- закодировать множество основных параметров в виде генов хромосомы;

Такие образом, генетические алгоритмы представляют собой один из наиболее эффективных способов решения крупномасштабных многокритериальных задач оптимизации. Задачи компоновки конструктивных блоков ЭВС являются задачами многокритериальной оптимизации, вследствие чего они трудно формализуемы и требовательны к вычислительно-временным ресурсам. Решением данной проблемы является использование генетических алгоритмов, которые позволяют снизить временные и вычислительные затраты.

Библиографический список

1. Абрайтис Л.Б. Алгоритм для определения максимально связанных наборов элементов // Автоматика и вычислительная техника. 1970. № 5. С. 40–47.
2. Гладков, Л.А. Биоинспирированные методы в оптимизации [Текст]: монография / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – М: Физматлит, 2009. – 384 с.
3. Гладков, Л.А. Генетические алгоритмы [Текст] / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – М.: Физматлит, 2010. – 317 с.
4. Гладков, Л.А. Методы генетического поиска [Текст] / Л.А. Гладков, Л.А. Зинченко, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик, Б.К. Лебедев, Е.В. Нужнов, С.Н. Сорокин. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. – 122 с.
5. Курейчик В.М. Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР : учебник для вузов / В. М. Курейчик . – М. : Радио и связь, 1990 . – 352 с.
6. Курейчик, В.М. Поисковая адаптация: теория и практика [Текст] / В.М. Курейчик, Б.К. Лебедев, О.К. Лебедев. – М: Физматлит, 2006. – 272 с.
7. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст]: Пер. с польск. И.Д. Рудинского / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М,: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
8. Al-Rabadi A.N., Barghash M.A. Fuzzy-PID control via genetic algorithm-based settings for the intelligent DC-to-DC step-down buck regulation. Engineering Letters, 2012. 20(2): p. 176–195.
9. Gabli M., Jaara E.M., Mermri E.B. A genetic algorithm approach for an equitable treatment of objective functions in multi-objective optimization problems. IAENG International Journal of Computer Science, 2014. 41(2): p. 102–111.
10. Lawler E.L. Electrical assemblies with a minimum number of interconnections // Comm.ACM, 1969. Vol. 12 (5).
11. Lawler E.L. The quadratic assignment problem // Management Science, 1963. Vol. 9, No. 7.
12. Zhang X., Wu C. Energy cost minimization of a compressor station by modified genetic algorithms. Engineering Letters, 2015. 23(4): p. 258–268.

УДК; ГРНТИ

ВЫБОР МАТЕРИАЛА И КОНСТРУКЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

А.И. Гусева
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, gusewa434@yandex.ru

Аннотация. В данной работе приведен процесс конструирования, основные характеристики материалов, особенности применения различных материалов в одном приборе, рассматривается конструкция устройства управления. Описывается принцип выбора материалов в зависимости от эксплуатационных требований.

Ключевые слова: конструирование, материал, прибор, обработка, сплав, химический состав, механические свойства.

THE CHOICE OF MATERIAL AND DESIGN OF ELECTRONIC EQUIPMENT

A.I. Guseva
Ryazan state University of radio engineering,
Russia, Ryazan, gusewa434@yandex.ru

Abstract. This article presents the design process, the basic characteristics of the materials, especially the using of different materials in a single device, the design of the control device. Described are various materials depending on performance requirements.

Key words. design, material, product, machining, alloy, chemical composition, mechanical properties.

Во времена возрастания сложности РЭА, перед конструктором возникают новые более сложные задачи. Функциональное назначение, условия эксплуатации, производственно-технологические требования, экономические показатели являются основными факторами, влияющими на конструкцию прибора.

Моя задача, как конструктора, заключается в компромиссном решении эксплуатационных и производственно-технических вопросов, в результате которых наиболее полно удовлетворяются требования к конструкции модуля управления.

На этапе предварительной разработки модуля управления были решены основные вопросы, связанные с защитой от дестабилизирующих факторов таких как: герметизация корпуса, защита от вибраций и ударов, защита от электромеханических помех, обеспечение нормального теплового режима.

Элементы в модулях всех уровней размещены таким образом, чтобы конструктивный объем был заполнен максимально и равномерно, также для доступа в случае ремонта, осмотра, замены. Для устойчивого положения центр тяжести находится ближе к опорной поверхности.

Корпус устройства выполнен в виде цилиндра с габаритными размерами 376 × 324 мм. Размеры, форма, стыковочные соединительные разъёмы определены местом установки данного устройства на объекте.

Корпус модуля управления состоит из основания, к которому с помощью винтов крепится обечайка, а также две крышки, которые крепятся сверху и снизу, делая прибор конструктивно законченным и защищая его при транспортировке и хранении. Крышки имеют желоба, в которые вкладываются резиновые уплотняющие прокладки. При сборке корпуса прокладки заполняют зазоры и делают его пылевлагонепроницаемым. Поверх прокладок укладываются жгуты, которые крепятся нитками за специальные отверстия. Концы жгутов заделываются в разъемы, с помощью которых блок управления соединяется с основным изделием.

Модуль управления состоит из 4 усилителей, устройства предстартового контроля, коммутатора и источника питания.

Устройство предстартового контроля состоит из двух плат, которые крепятся к корпусу с помощью винтов и стоек М2,5×8×13-56.016 и М2,5×20×25-56.016 ГОСТ 20862-81 [1], М2,5×8.56.023 ГОСТ 20865-81 [2]. Коммутатор состоит из 1 платы, которая крепится к корпусу винтами, стойками М2,5×20×25-56.016 ГОСТ 20862-81 [1], М2,5×20.56.023 ГОСТ

20865-81 [2]. Источник питания также состоит из платы, которая крепится к корпусу винтами и стойками М2,5×10.56.023 ГОСТ 20865-81 [2].

Внутрь корпуса в места, предусмотренные конструкцией, устанавливаются 4 усилителя. Основная управляющая часть усилителя размещается на 2 двусторонних печатных платах, которые крепятся с помощью винтов на колонки 2-8-39 ОСТ1 11293-73. Колонки, в свою очередь, крепятся к металлической панели. На основании корпуса усилителя расположены вилки соединителей, с помощью которых он подключается к блоку управления.

Так как устройство испытывает большие вибрации и нагрузки, а также для удобства размещения элементов и монтажа, выбрано горизонтальное расположение устройства. Такая конструкция удобна при сборке и разборке устройства при техническом обслуживании и ремонте. Отдельные составные части доступны для снятия и замены без демонтажа других составных частей.

Конструкция блока управления разрабатывалась с применением стандартизованных и унифицированных деталей и сборочных единиц. В разработке применяются конструктивно – компоновочные решения, апробированные в производстве и эксплуатации и обеспечивающие требования технического задания.

Выбор материала был сделан на основе анализа функционального назначения деталей, условий эксплуатации и технологических показателей. Так как материал является основой конструкции, он должен противостоять действию климатических и механических факторов. При прочих равных условиях был выбран тот материал, который допускает обработку наиболее прогрессивными методами: литьем, штамповкой, прессовкой, обработкой на станках с числовым программным управлением, так как в модуле управления имеются детали сложной формы и маленьких размеров. От свойств металла зависит точность детали, от точности детали зависит точность всего изделия.

Материал является прямым показателем габаритов и массы прибора, я применила достаточно легкий материал, так как модуль управления будет использоваться на морских судах, излишняя тяжесть в данном случае неприемлема. Технические параметры материала прямые показатели надежности и долговечности детали, также они согласованны с требованиями, предъявляемыми к конструкции прибора.

В качестве конструкционных материалов наиболее часто используют металлы. Номенклатура таких материалов разнообразна: это различные марки углеродистых и легированных сталей, алюминиевые сплавы для литья и холодной обработки, медные сплавы (латуни и бронзы), магниевые сплавы. Проанализировав вышеизложенные требования к конструкции и материалам, мною был выбран материал, применяемый для изготовления модуля управления это лист АМцМ ГОСТ 21631-76 [3]. АМц – это сплав алюминия с марганцем. Буквенное обозначение марок характеризует состав и состояние сплава: М — отожженный (мягкий). Сплав обладает высокой коррозионной стойкостью, так как, прибор будет эксплуатироваться в морских условиях повышенной влажности. Термической обработкой не упрочняется, и изделия из него применяются в отожженном состоянии или после упрочнения в результате холодной деформации. Для снятия нагартовки и повышения пластичности применяют отжиг при 350-410°С. АМц, хорошо сваривается газовой, атомно-водородной, аргонно-дуговой и контактной видами сварки.

Для защиты деталей их поверхности покрыты материалами, более стойкими к воздействию разрушающих факторов, так как многие металлы и другие материалы при эксплуатации подвергаются разрушению. По назначению все покрытия можно подразделить на защитные, защитно-декоративные и специальные.

При выборе покрытия мною были учтены следующие условия: назначение покрытия, условия эксплуатации, свойства покрытия, способ получения покрытия, экологичность, допустимость контакта металла и покрытия, экономическая целесообразность.

Для покрытия поверхности корпуса устройства управления было выбрано химическое окисное фосфатное покрытие, так как это покрытие удовлетворяет всем требованиям изложенным выше. Это защитное неметаллическое неорганическое покрытие, получаемое нане-

сением на металл раствора, содержащего азотнокислый барий, монофосфат цинка, азотнокислый цинк. Данное покрытие используется с целью защиты деталей атмосферной коррозии, повышенной адгезии лакокрасочных материалов, клеев.

Лакокрасочные покрытия (масляные и эмалевые краски, а также нитроэмали) я использую для защиты деталей и узлов аппаратуры от разрушающего воздействия внешней среды и технологических факторов при изготовлении изделий, а также для декоративной отделки и получения маркировочных обозначений.

Поверхность под жгутами модуля управления покрывается бесцветным лаком УР-231. В его основе алкидно-эпоксидный лак и отвердитель. Лак УР-231 применяется для защиты металлических изделий и печатных узлов всеклиматического исполнения, эксплуатируемых в интервале температур от минус 60 до плюс 120ºС, данный температурный интервал удовлетворяет условиям эксплуатации. Лак наносится методом распыления.

Наружная поверхность корпуса является самой контактирующей с внешней средой, она покрывается серой эмалью ЭП-140. Это суспензия красителей и наполнителей в смеси эпоксидной смолы смешанной с органическими растворителями с прибавлением отвердителя. Эмаль предназначена для окраски предварительно загрунтованных поверхностей из стали, магниевых, алюминиевых и титановых сплавов. Эмаль ЭП-140 обладает высокими противокоррозионными свойствами, атмосферостойкостью, стойкостью к воде, минеральным маслам, бензинам, что необходимо для защиты металла наружной поверхности модуля управления. Пленка эмали ЭП-140 обладает повышенной термостойкостью. Эмаль наносят методом распыления, как и лак.

При выборе материала для изготовления печатных плат я руководствовалась необходимыми требованиями к свойствам материала. Основными требованиями являются: хорошие электроизоляционные свойства, высокая термостойкость и механическая прочность, устойчивость к агрессивным технологическим средам, хорошая обрабатываемость, низкая стоимость, стабильность электрических и механических параметров печатной платы при климатических воздействиях.

На основе анализа требований к свойствам материала печатной платы мною был выбран стеклотекстолит СФ-2Н-35Г-2,0 1кл. ГОСТ 10316-78 [4]. Это нагревостойкий стеклотекстолит, облицованный с одной стороны медной электролитической гальваностойкой фольгой толщиной 35 мкм. Физико-механические и электрические показатели стеклотекстолита соответствуют следующим показателям: водопоглощение не более 21 мг, тангенс угла диэлектрических потерь в исходном состоянии не более 0,035, диэлектрическая проницаемость в исходном состоянии не более 5,5 Ф/м, время устойчивости к воздействию теплового удара при температуре 260ºС не менее 20 с.

Для приклеивания элементов используется клей ВК-9. Он был выбран с учетом материалов склеиваемых деталей, в том числе имеющих металлические и неметаллические (неорганические) покрытия, диапазона температур среды при эксплуатации и режимов отверждения клеев, механических свойств, электроизоляционных свойств, электрических параметров. Сделан он на основе эпоксидных и полиамидных смол. В модуле управления клей применяется в качестве дополнительного крепления радиоэлементов, микросхем и микросборок на печатные платы.

В заключение данной статьи можно сделать вывод, что в процессе конструирования выбор материалов и конструкции радиоэлектронной аппаратуры является важной частью работы. Инженер-конструктор должен ответственно подходить к этому этапу разработки конструкции изделия. Мною был проведен анализ основных воздействующих факторов на модуль управления и в результате был сделан выбор материалов и конструкции по оптимальной стоимости с учетом всех вышеизложенных требований.

Библиографический список

1. ГОСТ 20862-81 Стойки установочные крепежные шестигранные с резьбовыми концом и отверстиями.
2. ГОСТ 20865-81 Стойки установочные крепежные шестигранные с резьбовыми отверстиями.
3. ГОСТ 21631-76 Листы из алюминия и алюминиевых сплавов.
4. ГОСТ 10316-78 Гетинакс и стеклотекстолит фольгированные.

УДК 004.451.54; ГРНТИ 20.15.05

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССАКОНТРОЛЯ И ПОДГОТОВКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРТИЗЫ ВНУТРЕТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ СЧЕТОВ ОМС

Е. Тишкина
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань

*Аннотация.*В данной работе рассмотрена автоматизация информационного взаимодействия в системе обязательного медицинского страхования отдельного региона при проведении внутритерриториальных расчётов за оказанную медицинскую помощь.
Ключевые слова: обязательное медицинское страхование, экспертиза, участники информационного взаимодействия.

AUTOMATIONPROCESS OF MONITORING AND PRERARATION OF THE INFORMATION FOR EXAMINATION INTRA-TERRITORIAL ACCOUNT OBLIGATORY MEDICAL INSURANCE

E. Tishkina
Ryazan State Radio Engineering University.
Russia, Ryazan

Abstract. In this work the automation of information exchange in the system of obligatory medical insurance individual region during intra-territorial payments for medical assistance.
Keywords: obligatory medical insurance, examination, participants of information interaction.

Компьютерные и информационные технологии без преувеличения можно назвать наиболее динамичной областью современных знаний, которые концентрируют в себе самые последние достижения в сфере науки и техники. Появление новых моделей процессоров и комплектующих, версий операционных систем и программного обеспечения происходит на фоне постоянного усложнения не только отдельных физических и программных компонентов, но и лежащих в их основе концепций.

Сейчас в мире активно идет процесс перехода с хранения информации на бумажных носителях на магнитные, магнитооптические, оптические, электронные носители информации. Наша страна также не осталась в стороне, и не так давно руководством государства был взят курс на информатизацию общества, в частности на переход к электронному документообороту, вместо «бумажного».

В соответствии сприказом Федерального фондаприказом Федерального фонда обязательного медицинского страхования от 7.04.2011 № 79«Об утверждении Общих принципов построения и функционирования информационных систем и порядка информационного взаимодействия в сфере обязательного медицинского страхования» и приказом Федерального фонда обязательного медицинского страхования от 26.12.2013 № 276 «О внесении изменений в приказ ФОМС от 07.04.2011 г. № 79», положением о порядке информационного взаимодействия в сфере ОМС на территории Рязанской области, утвержденнымприказом Директора ТФОМС Рязанской области №128 от 23.04.2012 существует необходимость в разработке единой информационной системы реализующей положения, озвученные в этихдокументах. В данных документах устанавливаются общие принципы построения и функционирования информационных систем и порядок информационного взаимодействия в сфере обязательного медицинского страхования [3].

Участниками информационного взаимодействия в сфере ОМС являются:

- Федеральный фонд обязательного медицинского страхования (ФФОМС);
- Территориальный фонд обязательного медицинского страхования Рязанской области (ТФОМС РО);
- Юридические лица, осуществляющие медицинское страхование и имеющие государственное разрешение (лицензию) на право заниматься обязательным медицинским страхованием (СМО);

- Медицинские организации, участвующие в реализации территориальной программы ОМС (МО)[2].

В реализуемой информационной системе участники взаимодействия обмениваются между собой информацией. Однократный ввод первичной информации – это данные, необходимые для функционирования системы, вводимые однократно и в дальнейшем используются на всех этапах жизненного цикла этой информации[1].

Каждый участник информационной системы использует определенные входные данные, которые после выполнения определенных функций преобразуются в выходные данные.

Сотрудники МО обеспечивают ввод и сохранение сведений о застрахованных лицах, сведения о медицинской помощи, оказанной застрахованным лицам. Также они обеспечивают формирование и отправку сообщений со счетами за медицинскую помощь, оказанную лицам, застрахованным на территории РО в разрезе для каждой СМОи застрахованным лицам за пределами субъекта Российской Федерации, на территории которого выдан полис обязательного медицинского страхования, в ТФОМС территорий страхования.

Для оптимизации доступа и обработки пользователем загруженных счетов в систему реализован механизм отображения в форме «Счета», счетов определенного типа. В зависимости от выбранного пользователем пункта меню в форму отбираются счета соответствующего типа:

- Счета от МО. Застрахованные в данном регионе – тип счета «От МО РО»;
- Счета от МО. Застрахованные в другом регионе – тип счета «От МО не РО»;
- Счета от других территориальных фондов – тип счета «От др ТФ».

В момент регистрации пользователя в ИС настраиваются типы счетов, доступные ему для работы. Одному пользователю могут быть доступны несколько типов счетов.

Форма «Счета» состоит из трех частей:

- Реестр – содержит перечень загруженных в ИС счетов заданного типа.
- Содержание – содержит по текущему счету перечень случаев, перечень оказанных услуг, а также ошибки по случаям и услугам, выявленные в результате проверки счета.
- Ошибки по счету – содержит список ошибок текущего счета, выявленных в результате экспертизы счета.

СМО выполняют сбор, обработку, передачу и хранение сведений о медицинской помощи, данных об оплате и результатах контроля объемов, сроков, качества и условий предоставления медицинской помощи по ОМС.

Лица, осуществляющие медицинское страхование проводят:

- идентификацию страховой принадлежности застрахованного лица;
- форматно-логический контроль реестров счетов, принятых от МО.
- автоматизированную поддержку медико-экономического контроля, медико-экономической экспертизы и экспертизы качества медицинской помощи по реестрам счетов, принятых от МО.
- формирование и отправку сообщений в МО с протоколами обработки реестров счетов.

ТФОМС РО осуществляет:

1) Контроль объемов, сроков, качества и условий предоставления медицинской помощи по ОМС, оказанной на территории РФ, гражданам, застрахованным в РО;

2) Повторный контроль объемов, сроков, качества и условий предоставления медицинской помощи по ОМС, оказанной гражданам, застрахованным на территории РО:

- Форматно-логический контроль реестров счетов от ТФОМС РО;
- Автоматизированная поддержка медико-экономического контроля по реестрам счетов от ТФОМС РО;
- Автоматизированная поддержка медико-экономической экспертизы по реестрам счетов от ТФОМС РО;
- Автоматизированная поддержка экспертизы качества медицинской помощи по реестрам счетов от ТФОМС РО.

Участник системы - Федеральный фонд обязательного медицинского страхования вдет НСИ (Нормативно-справочная информация - информация, заимствованная из нормативных документов и справочников, используемая при функционировании информационной системы) и реестры федерального уровня.

Разрабатываемые модули системы предназначены для решения следующих задач:

- Автоматизация процесса медико-экономической контроля;
- Подготовка информации для проведения медико-экономической экспертизы;
- Подготовка информации для проведения экспертизы качества медицинской помощи;
- Подготовка в электронном виде счетов и сопроводительной документации;
- Подготовка отчетной информации.

Одними из важнейших данных в проектируемой системе являются различные справочники и классификаторы. В соответствии с ними осуществляется работа всей системы. Справочник отличается от классификатора наличием у каждой записи даты начала и даты окончания ее действия.

В программном комплексе хранение данных осуществляться в системе управления базами данных, обеспечивающей:

- накопление, хранение и обработка данных;
- регламентация доступа к данным и управлению базой данных;
- изменение структуры и содержания данных;
- целостность данных;
- устойчивость к техническим и программным сбоям;
- управление многопользовательской работой;
- наличие процедур логического и физического резервного копирования и восстановления данных.

На основании исследования предметной области и требований к системе была спроектирована и реализована модель базы данных, представленная. В качестве инструмента использовался MS SQL Server 2005.

Использование современных технологий позволяет не только хранить полученные данные на носителях занимающих мало места и обеспечивая при этом практически мгновенный доступ к требуемой информации, но и комбинировать и обрабатывать их различным образом для получения наглядных отчетов и графиков, расчет которых вручную был немыслим из-за больших трудовых и временных затрат на него.

Разрабатываемая информационная система имеет большую практическую ценность, так как обеспечивает эффективность работы и позволяет удобно и экономически более выгодно расширять функционал программы при необходимости.

Библиографический список

1. Федеральный закон "Об обязательном медицинском страховании в Российской Федерации" от 29.11.2010 № 326-ФЗ //Информационная система «КонсультантПлюс».

2. Приказ ФФОМС от 07.04.2011 № 79 (ред. от 09.09.2016) "Об утверждении Общих принципов построения и функционирования информационных систем и порядка информационного взаимодействия в сфере обязательного медицинского страхования"//Информационная система «КонсультантПлюс».

3. Положение о порядке информационного взаимодействия в сфере ОМС на территории Рязанской области, утвержденное Приказом Директора ТФОМС Рязанской области №128 от 23 апреля 2012 г. //Электронный ресурс http://docs.pravo.ru/document/view/32288550/34464775/.

УДК ; ГРНТИ

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ НА НАДЕЖНОСТЬ ДУБЛИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ С НЕНАГРУЖЕННЫМ РЕЗЕРВОМ

Р.И. Никитин, И.А. Лебедев

Рязанский государственный радиотехнический университет

Аннотация. Важным способом повышения надежности систем является структурное резервирование. Среди различных схем резервирования в ряде случаев предпочтительна схема с ненагруженным резервом, когда функции основного элемента передаются резервному элементу только при отказе основного.

В исходной статье получено расчетное соотношение, позволяющее оценить влияние интенсивностей отказов и восстановлений переключателя на надежность всей восстанавливаемой системы. Для вывода соответствующей формулы используется система уравнений Колмогорова рассматриваемой дублированной системы с неидеальным переключателем.

Теоретические положения проверены на математической модели, собранной в программной среде MATLAB + Simulink. Получены сопоставимые значения коэффициентов готовности по составленной формуле и графикам собранной модели.

Ключевые слова: надежность, переключатель, резервирование, коэффициент готовности.

ANALYSIS OF THE IMPACT ON THE RELIABILITY OF THE SWITCH REDUNDANT SYSTEM STANDBY

R.I Nikitin, I.A. Lebedev

Ryazan State Radio Engineering University

Annotation. An important way to increase the reliability of the systems is a structural redundancy. Among the various redundancy schemes in some cases preferred scheme dormant when the functions of the main cell are transmitted backing element only when the failure of the primary.

In the original article, the calculated ratio is obtained, allowing to evaluate the impact of failure rates and recoveries switch on the reliability of the system being recovered. To derive the corresponding formula is used Kolmogorov equations is considered redundant systems with non-ideal switch.

Theoretical positions tested on the mathematical model in a software environment collected MATLAB + Simulink. We obtain comparable values for the coefficients ready prepared formula and graphs collected model.

Keywords: reliability, switch, redundancy, readiness koeffitsient.

1. Введение

Важным способом повышения надежности систем является структурное резервирование. Среди различных схем резервирования в ряде случаев предпочтительна схема с ненагруженным резервом (рис. 1), когда функции основного элемента передаются резервному элементу только при отказе основного. Оценка надежности такой системы произведена в работах [1, 2].

2. Математическая модель надежности переключателя

Между тем расчетное соотношение, позволяющее оценить влияние интенсивностей отказов и восстановлений переключателя на надежность всей восстанавливаемой системы, в указанных работах отсутствует.

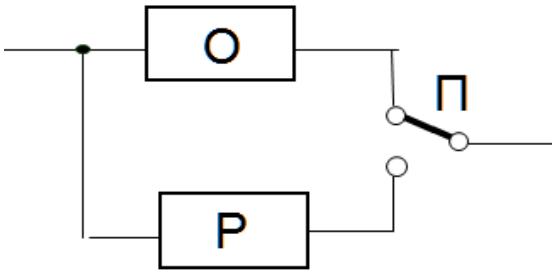


Рис. 1. Система с ненагруженным резервом: О – основнойэлемент; Р – резервныйэлемент; П – переключатель

Уравнения Колмогорова системы с ненагруженным резервом и идеальным переключателем:

$$\left.\begin{aligned} &P_0^{/}(t) = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ &P_1^{/}(t) = \lambda P_0(t) - (\lambda + \mu)P_1(t) + 2\mu P_2(t); \\ &P_2^{/}(t) = \lambda P_1(t) - 2\mu P_2(t). \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

Здесь $P_i(t)$– вероятность нахождения системы в состоянии i(i =0, 1, 2). Состояние 0 – работает основной элемент, состояние 1 – работает резервный элемент, состояние 2 – оба элемента отказали и ремонтируются. Интенсивности отказов и восстановлений элементов обозначены соответственно λ и μ.

Выражение коэффициента готовности дублированной системы с ненагруженным резервом и идеальным переключателем, как показано в [1], имеет вид:

$$K_{\Gamma} = P_0 + P_1 = \frac{2\mu \cdot (\lambda + \mu)}{\mu^2 + (\lambda + \mu)^2}. \quad (2)$$

В работе [2] дана оценка вероятности безотказной работы и средней наработки до отказа дублированной восстанавливаемой системы с общим переключателем. В [2] дан следующий граф процесса переходов в дублированной восстанавливаемой системе с общим переключателем.

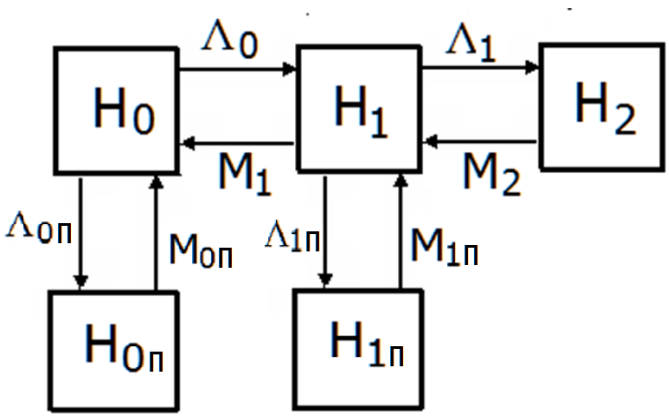


Рис. 2. Граф процесса переходов дублированной восстанавливаемой системы с не абсолютно надежным переключателем

Однако расчетные соотношения, показывающие влияние характеристик надежности переключателя на коэффициент готовности системы, в указанной работе не получены.

Уравнения Колмогорова дублированной восстанавливаемой системы с ненагруженным резервом и не идеальным переключателем:

$$\left.\begin{aligned} &P_0^{/}(t) = -(\Lambda_0 + \Lambda_{\Pi})P_0(t) + M_1 P_1(t) + M_{0\Pi} P_{0\Pi}(t); \\ &P_1^{/}(t) = \Lambda_0 P_0(t) - (\Lambda_1 + \Lambda_{\Pi} + M_1)P_1(t) + M_2 P_2(t) + M_{1\Pi} P_{1\Pi}(t); \\ &P_2^{/}(t) = \Lambda_1 P_1(t) - M_2 P_2(t); \\ &P_{0\Pi}^{/}(t) = \Lambda_{0\Pi} P_0(t) - M_{0\Pi} P_{0\Pi}(t); \\ &P_{1\Pi}^{/}(t) = \Lambda_{1\Pi} P_1(t) - M_{1\Pi} P_{1\Pi}(t); \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

Уравнения (3) решаем при следующих соотношениях интенсивностей отказов в системах (1) и (3):

$\Lambda_0 = \Lambda_1 = \lambda$; $M_2 = 2\mu$; $M_1 = \mu$; $\Lambda_{0\Pi} = \Lambda_{1\Pi} = \lambda_{\Pi}$; $M_{0\Pi} = M_{1\Pi} = \mu_{\Pi}$.

Решение системы уравнений (3) получаем при добавлении к ним уравнения

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_{0П} + P_{1П} = 1. \qquad (4)$$

В стационарном режиме работы системы при t → ∞ все производные функций Pi(t) приравниваются нулю.

Коэффициент готовности дублированной системы с учетом интенсивности отказов и восстановлений переключателя (рис. 1) вычисляется как сумма вероятностей P_0и P_1:

$$K_Г = P_0 + P_1 = \frac{2\mu \cdot (\lambda + \mu)}{\mu^2 + (\lambda + \mu)^2 + 2\mu \dfrac{\lambda_П}{\mu_П}(\lambda + \mu)}. \qquad (5)$$

Сопоставление выражений (2) и (5) показывает, что коэффициент готовности системы с переключателем снижается с увеличением отношения интенсивности $\lambda_П$ отказов переключателя к интенсивности $\mu_П$ его восстановлений. При этом полученная в данной работе формула (5) позволяет численно оценить влияние отношения $\frac{\lambda_П}{\mu_П}$ нанадежность системы, определяемую коэффициентом готовности.

3. Моделирование в среде Matlab

Теоретические положения проверялись на математической модели, собранной в программной среде MATLAB+Simulink (рис. 3).

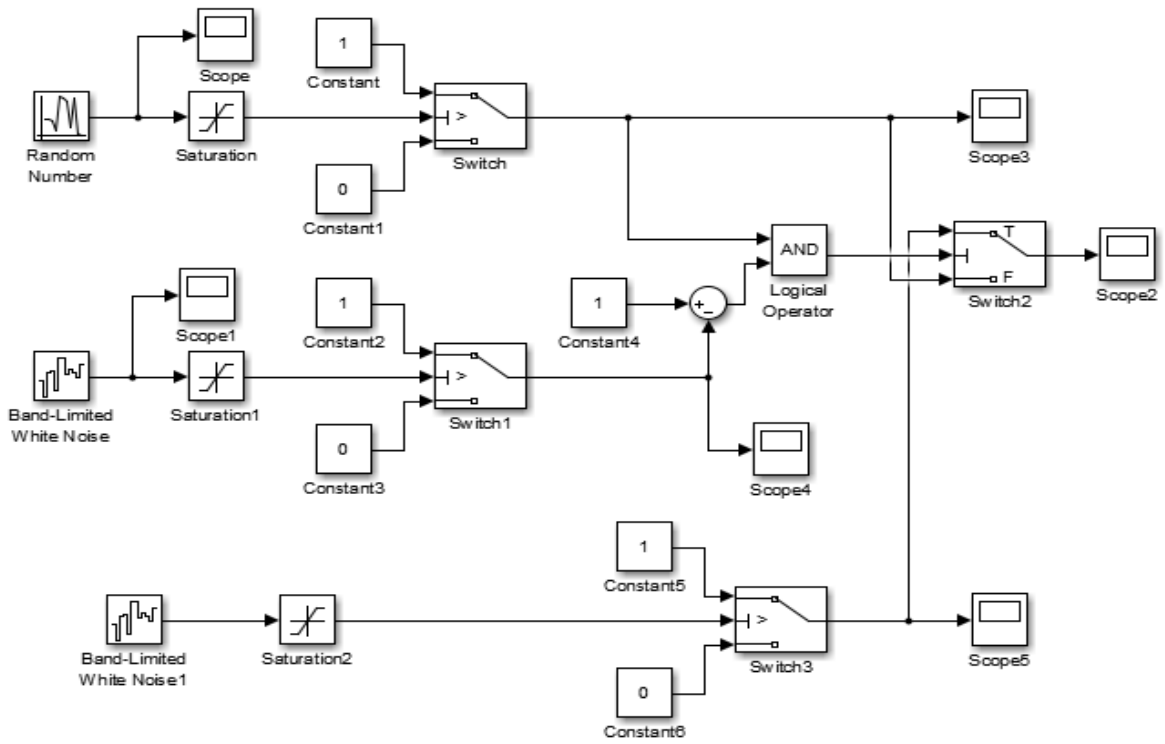


Рис. 3. Модель дублированной восстанавливаемой системы с не абсолютно надежным переключателем в программной среде MATLAB+Simulink

Схема моделирования (рис. 3) включает 3 аналогичные ветви воспроизведения потока отказов (соответственно 2 образцам оборудования и переключателю). Каждая из этих ветвей содержит:

- источник случайного сигнала; при этом для одного образца применен источник случайного сигнала с нормальным распределением (RandomNumber), для второго и переключателя - генератор белого шума с различающимися параметрами (BandLimitedWhiteNoise);
- два источника постоянных уровней «0» и «1» (блоки Constant);

- блок ограничения (Saturation) и управляемый переключатель (Switch) из раздела нелинейных блоков (Nonlinear).

Для воспроизведения потока отказов резервированной системы применен блок управляемый переключатель Switch.

Для подключения не идеального переключателя используется логический блок или (OR).

Установим в окнах настроек блоков следующие значения их параметров:

- в окне параметров источника случайного сигнала RandomNumber среднее значение сигнала Mean = 0 и среднеквадратическое отклонение Variance = 2;
- для генератора белого шума резервного элемента мощность шума Noisepower = 10-1, эталонное время Sampletime = 0,1 и инициализирующее генератор число Seed ≈ 23341;
- для генератора белого шума переключателя мощность шума Noisepower = 10-1, эталонное время Sampletime = 0,2 и инициализирующее генератор число Seed ≈ 32000;
- в окнах параметров нелинейных блоков Saturation пороги ограничения Lowerlimit = 0,8 (для переключателя - 0,5) и Upperlimit = 1,0 (нижний и верхний соответственно);
- порог управляющего сигнала Threshold = 0,9 переключателя Switch, Switch1, Switch3;
- критерий Criteria for passing first input: u2 ~= 0 для Switch2.

Установить время моделирования: Starttime=0 и Stoptime = 10.

Можно условиться, что одна единица «машинного» времени равна 100 часам времени реального.

Коэффициент готовности дублированной системы с неидеальным переключателем, рассчитанный по формуле:

$$K_{Г} = 0{,}91.$$

Коэффициент готовности, полученный из виртуальной модели:

$$K_{ГВ} = 0{,}93.$$

4. Вывод

Полученные коэффициенты приблизительно равны. Это указывает на то, что выведенная формула дает верный результат и позволяет рассчитывать коэффициент готовности системы с ненагруженным резервом и неидеальным переключателем с известными показателями надежности λ и μ.

Библиографический список

1. Дорохов А.Н., Керножицкий В.А., Миронов А.Н., Шестопалова О.Л. Обеспечение надежности сложных технических систем. – СПб.: Лань, 2011. – 352 с.

2. Смоляров Н.А. Оценка надежности дублированной восстанавливаемой системы с общим переключателем // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2007.Вып. 21. С. 43-47.

УДК 658.513.1, ГРНТИ 20.53.15

ЦИКЛИЧНЫЙ СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ГРАФИКОВ РАБОТ ПО ПОДГОТОВКЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

А. Королев, С. Спицын

Филиал Акционерного общества «Ракетно-космический центр «Прогресс»
- Особое конструкторское бюро «Спектр»,
Россия, Рязань,korolev.lesha@mail.ru, spitsyn62@gmail.com

Аннотация. В данной работе описан способ формирования электронных графиков работ, позволяющий оптимизировать использование ресурсов при планировании работ со сложным технических объектом.

Ключевые слова: график работ, технологическая операция, сложный технический объект

CYCLICALLY METHOD FORMING ELECTRONIC SCHEDULE OF WORKS FOR PREPARATION AND EXPLOITATION OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS

A. Korolev, S. Spitsyn
Branch of Joint-stock company «Space-rocket center «Progress»
- Special design office «Spectr»
Russia, Ryazan, korolev.lesha@mail.ru, spitsyn62@gmail.com

Abstract. This article describes the method of forming of the electronic work schedule which allows to usefully optimize the resources during complex technical object work planning.

Keywords: work schedule, technical operation, complex technical object

Для сложных технических объектов (СТО), таких как изделия РКТ, одновременно выполняется значительное число работ и операций, результаты которых влияют на очередность следующих работ и операций в соответствии с технологическим процессом. Нарушение установленных правил и логики следования операций может привести к нештатным и аварийным ситуациям. Для контроля качества и полноты выполнения работ по подготовке сложного технического объекта к эксплуатации выполняют многоэтапные контрольные проверки состояния объекта и его компонентов. С этой целью разрабатываются скрупулезные технологические графики выполнения работ, содержащие порядок операций с объектом и условия для их выполнения [1].

Составление графика работ является одним из наиболее ответственных этапов при планировании. Рассматриваемый способ формирования электронных графиков работ с целью обеспечения соблюдения необходимых технологических требований эксплуатации предполагает формирование графиков в четыре этапа, как показано на рисунке 1.

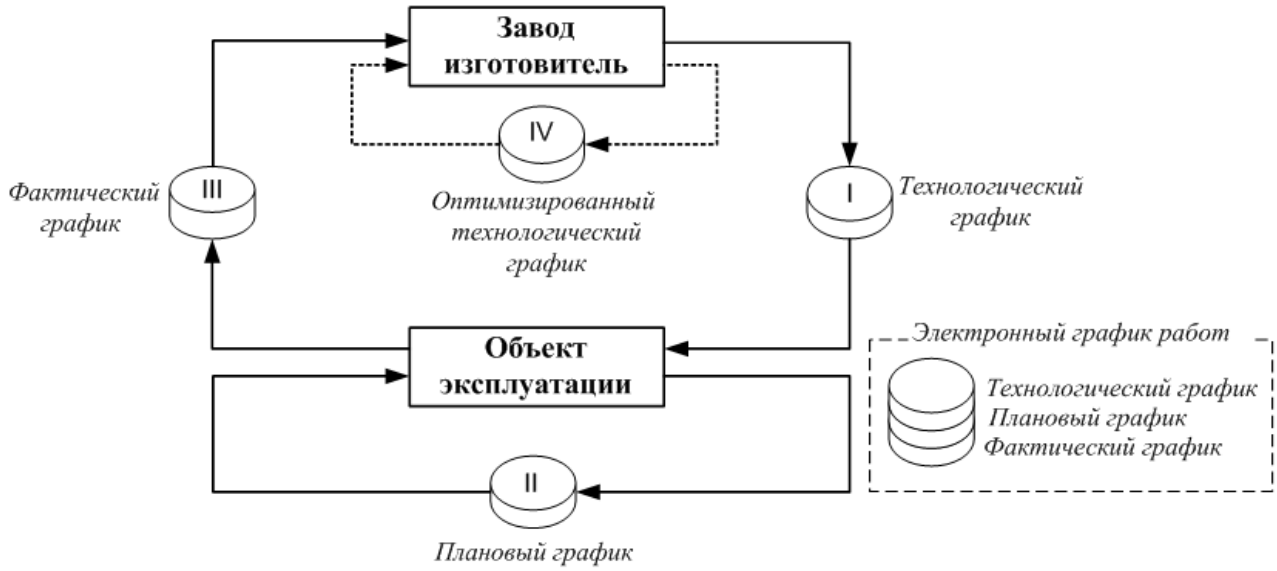


Рис. 1. Схема формирования электронного графика работ

Описываемый способ основан на цикле качества PDCA («цикле Деминга»), применяемом в процессорном подходе управления и направленном на постоянное улучшение качества продукции и предоставляемых услуг. Цикл PDCA включает четыре шага: планирование ресурсов («Plan»), выполнение процесса («Do»), анализ показателей эффективности проесса («Check») и корректировка процесса («Adjust») [2]. Цикл PDCA включает следующие базовые требования:

– все этапы цикла выполняются в соответствии с регламентом работ;

– определены отвественные исполнители по каждому этапу;

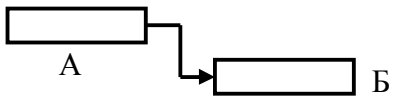
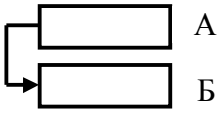
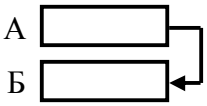
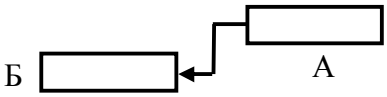
– при проведении анализа ипользуются строго определенные критерии оценки и показатели эффективности технологического процесса.

Ниже приведено описание этапов формирования электронного графика работ, соответсвующих шагам цикла PDCA.

На первом этапе планирования ресурсов, выполняемом на заводе изготовителе объекта контроля, формируют технологический график операций (шаблон) «как должно быть в соответствии с эксплуатационной документацией» с указанием условий перехода между операциями [1]. При этом отдельная технологическая операция контролируемого объекта характеризуется следующими обязательными атрибутами – уникальный код операции, наименованием операции, время начала выполнения (относительно начала работ), плановая длительность выполнения операции. Дополнительно, при необходимости, указывается эксплуатационная документация, регламентирующая порядок выполнения операции, состав ответственных исполнителей, перечень типовых нештатных ситуаций с описанием тревожных сообщений, список оборудования, задействованного при выполнении операции, а так же перечень контролируемых диагностических параметров. Отдельные операции могут сопровождаться отличительными характерными признаками, влияющими на их исполнение, такими как, непрерывность выполнения, опасность (к примеру, операции, связанные с горючими материалами), квитируемость (требующие подтверждения выполнения оператором вручную) и автоматический контроль (с регистрацией выполнения по контролируемым параметрам).

Порядок следования операций на технологическом графике определяется в строгом соответствии со связями между ними. Типы возможных связей между операциями приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Типы связей между операциями

Тип связей	Представление	Описание
Окончание-начало (ОН).		Операция Б не может начаться, пока не закончится операция А.
Начало-начало (НН).		Операция Б не может начаться, пока не начнется операция А.
Окончание-окончание (ОО).		Операция Б не может закончиться, пока не закончится операция А.
Начало-окончание (НО).		Операция Б не может закончиться, пока не начнется операция А.

Определение логики взаимосвязей между операциями технологического графика позволяет осуществить расчет выполнения работ по времени и выявить операции критической зоны, влияющие на общую длительность выполнения графика и требующие особого внимания при организации работ.

Исходя из особенностей организации работ по подготовке и эксплуатации сложных технических объектов структура графиков является иерархичной, при этом число уровней вложенности операций зависит от необходимой степени детализации составных частей СТО и зон ответственности исполнителей. Схема организации вложенности технологических операций представлена на рисунке 2.

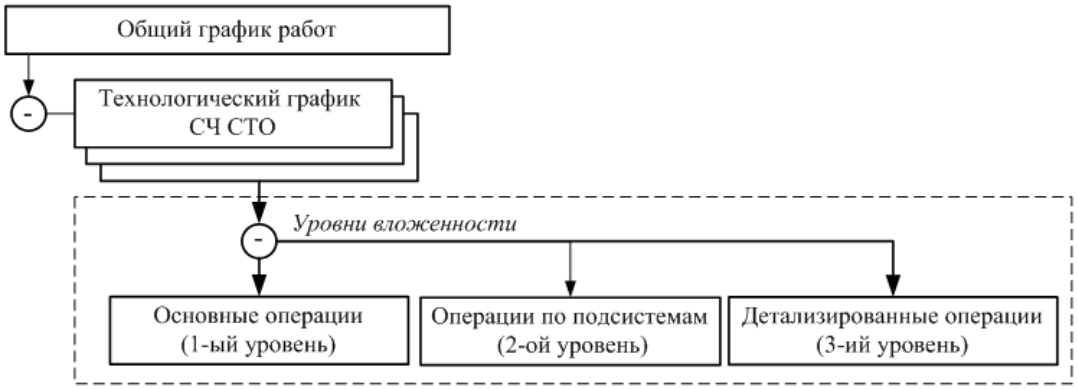


Рис.2. Схема уровней вложенности графика работ

На втором этапе планирования работ, выполняемом на объекте эксплуатации, формируют плановый график операций «как должно быть при конкретной работе с экземпляром сложного технического объекта», для чего используют в качестве шаблона технологический график операций, подготовленный на первом этапе, в котором для каждой операции указывается плановое время начала и плановое время завершения операции, вычисляемые автоматически относительно конкретной даты и времени начала работ [1]. В общем случае, для удобства восприятия информации, на основании одного технологического графика, может быть построено несколько плановых графиков работ по отдельным этапам подготовки СТО. Плановые графики операций используются для оперативного управления выполнением работ на объекте эксплуатации. Таким образом, шаг планирования процесса PDCA объединяет первые два этапа, связанных с формированием технологического и плановых графиков работ.

На третьем этапе, соответствующем шагу выполнения процесса PDCA, в ходе выполнения технологических операций с объектом, формируют фактический график операций «как реализовано», для каждой операции в котором добавляют фактическое время начала, фактическое время окончания, а так же при необходимости множественные данные по нештатным ситуациям с временем начала и временем их разрешения [1].

На четвертом этапе, соответствующем шагу анализа PDCA, фактический график, сформированный по результатам работ на объекте эксплуатации, анализируются на заводе изготовителе в соответствии с определенными критериям оценки эффективности выполнения отдельных технологических операций. По результатам оценки показателей эффективности вносят необходимые корректировок в исходный технологический график с целью оптимизации используемых ресурсов, что соответствует шагу корректировки PDCA. Оптимизированный технологический график работ используется при последующих работах на объекте эксплуатации с новым экземпляром СТО. Таким образом, осуществляется планомерный мониторинг выполнения технологических операций со стороны главных конструкторов СЧ СТО с целью повышения качества подготовки и эксплуатации СТО в целом.

Рассматриваемый цикличный способ формирования электронных графиков работ на основе цикла качества PDCA позволяет повысить эффективность подготовки и эксплуатации СТО за счет оптимизации затрачиваемых ресурсов на этапе планирования работ с объектом.

Библиографический список

1. Способ управления процессами подготовки и эксплуатации сложных технических объектов и система для его осуществления: пат. 2552881 МПК G06F 19/26 / В.И. Везенов, А.В. Королев, А.Н. Пресняков, О.Г. Светников; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс» (АО «РКЦ «Прогресс»). – № 2013152141/08; заявл. 22.11.2013; опубл. 10.06.2015, Бюл. №16.
2. Репин В.В., Елиферов В.Г.Процессорный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. – 2-е издание – М.: РИА «Стандарты и качество», 2005. – 408 с., илл. – (Серия «Практический менеджмент»).

УДК 531.383; ГРНТИ 50.03.03

О СТЕПЕНИ УСТОЙЧИВОСТИ ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ МАССЫ

Д. Кузин, В. Федоров
Рязанский государственный радиотехнический университет
Россия, Рязань, kuzindmitry94@gmail.com

Аннотация. В данной работе рассмотрено влияние параметров импульсной системы регулирования положением массы на степень устойчивости системы, сопоставлены степени устойчивости импульсной и непрерывной систем регулирования положением массы, показано, что для импульсной системы зависимость степени устойчивости от коэффициента усиления трансформируется в известную зависимость напряженности поля тяготения от расстояния до центра притяжения масс.

Ключевые слова: импульсное регулирование, степень устойчивости, положение массы

ABOUT THE DEGREE OF STABILITY OF IMPULSE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM POSITION OF THE MASS

D. Kuzin, V. Fedorov
Ryazan state radioengineering university
Russia, Ryazan, kuzindmitry94@gmail.com

Abstract. In this work the influence of parameters of pulse regulation system the position of the mass on the degree of stability of the system, mapped the degree of stability of pulse and continuous control systems the position of the mass, it is shown that for a pulsed system, the degree of stability of gain transformed in the well-known dependence of the intensity of the gravitational field from the distance to the center of gravity of the masses.

Keywords: automatic control system, impulse control system, analog control system

Системы импульсного регулирования [1] находят практическое применение благодаря ряду положительных особенностей, таких как помехозащищенность, возможность многоканального управления. В работе [2] решалась задача сопоставления динамики импульсной САР положением массы по одной оси с аналогичной непрерывной системой, где исполнительное устройство представляется апериодическим звеном. Было найдено условие эквивалентности этих САР. В данной статье ставится задача анализа и сопоставления динамики импульсной и непрерывной САР с безынерционным регулятором.

Структурная схема рассматриваемой системы приведена на рисунке 1.

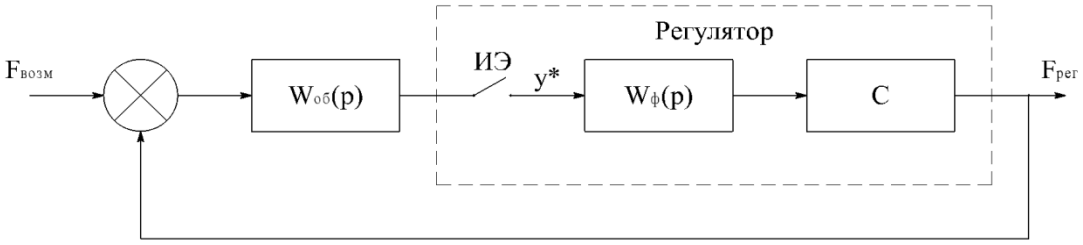


Рис. 1. Структурная схема рассматриваемой системы: ИЭ – импульсный элемент; Wф(p) – передаточная функция фиксатора (интерполятора); С – безынерционный регулятор

Передаточная функция непрерывной части разомкнутой САР положением массы при безынерционном регуляторе имеет вид

$$W_H = \frac{c}{h(T_П p + 1)p}, \tag{1}$$

где с – коэффициент усиления (жесткость регулирования), ТП – постоянная времени, определяемая отношением массы m объекта регулирования к коэффициенту демпфирования h.

Импульсы управляющей силы представляются следующей функцией:

$$F_{упр}(t) = \begin{cases} cy(mT) & при\ mT \le t \le mT + T\gamma \\ 0 & при\ mT \le t \le mT + T\gamma \end{cases},$$

где T – период квантования; m=0,1,2,…; γ – коэффициент заполнения управляющего импульса ($0 \le \gamma \le 1$); y – регулируемая координата.

Выражение дискретной передаточной функции рассматриваемой САР в разомкнутом состоянии имеет вид [1]:

$$W^*(z) = \frac{c}{h}\left[\frac{T\gamma}{z-1} + T_П e^{-\beta}\frac{1-e^{\beta\gamma}}{z-e^{-\beta}}\right]; \tag{2}$$

где $\beta = T/T_П$; $z = e^{Tp}$.

Характеристическое уравнение импульсной САР при W*(z) вида (2) запишется следующим образом:

$$1 + \frac{c}{h}\left[\frac{T\gamma}{z-1} + T_n e^{-\beta}\frac{1-e^{\beta\gamma}}{z-e^{-\beta}}\right] = 0. \tag{3}$$

Уравнение (3) преобразуется к виду:

$$z^2 - z\left[1 + e^{-\beta} - \chi(1-d)\right] + e^{-\beta} + d\chi - e^{-\beta}\chi = 0, \tag{4}$$

где введены следующие обозначения $d = e^{-\beta}\left(e^{\beta\gamma} - 1\right)/(\beta\gamma)$; $\chi = cT\gamma/h$.

Корни такого уравнения ищутся, как известно, в виде:

$$z_{1,2} = \frac{1 + e^{-\beta} - \chi(1-d)}{2} \pm \frac{\sqrt{D}}{2}, \tag{5}$$

где $D = \chi^2(1-d)^2 - 2\chi(1+d)\left(1-e^{-\beta}\right) + \left(1-e^{-\beta}\right)^2$.

Условие наличия в импульсной САР степени устойчивости не менее η, как известно [3], записывается

$$\left|z_i\right|_{\max} \le e^{-\eta T}, \tag{6}$$

где $\left|z_i\right|_{\max}$ – максимальный из корней (5) по модулю.

Выделим три случая при решении неравенства (6):

1. $D \ge 0; 1 + e^{-\beta} - \chi(1-d) \le 0;$ (7)
2. $D \ge 0; 1 + e^{-\beta} - \chi(1-d) \ge 0;$ (8)

Тогда (8) сводится к неравенству:

$$2e^{-\eta T} \ge 1 + e^{-\beta} - \chi(1-d) + \sqrt{D}. \tag{9}$$

3. $D < 0; 4e^{-\eta\beta} \ge \left[\chi(1-d) - \left(1+e^{-\beta}\right)\right]^2 - D.$ (10)

Соотношения (6), (7) и (10) связывают степень устойчивости с параметрами исследуемой САР. Определяющим с точки зрения устойчивости является коэффициент передачи *c* (т.е. жесткость).

При обозначении $c_1 = c\gamma$ из неравенств (7), (8) и (10) получаем:

$$c_1 \le \frac{h}{T} \times \frac{e^{-2\eta T} - e^{-\eta T}(1+e^{-\beta}) + e^{-\beta}}{e^{-\eta T}(1-d) + e^{-\beta} - d}; \tag{11}$$

$$c_1 \le \frac{h}{T} \times \frac{e^{-2\eta T} - e^{-\eta T}(1+e^{-\beta}) + e^{-\beta}}{-e^{-\eta T}(1-d) + e^{-\beta} - d}; \tag{12}$$

$$c_1 \le \frac{h}{T} \times \frac{e^{-2\eta T} - e^{-\beta}}{d - e^{-\beta}}. \tag{13}$$

При анализе соотношений (11), (12), (13) надо учитывать, что каждое из них справедливо в определенной области параметров. Эти области находятся решением соответствующих неравенств (7), (8), (10) с учетом ранее полученного выражения *D* и введенных обозначений *d* и *χ*.

Так, например, в случае $\beta >> 1$ допустимая величина жесткости определяется неравенством (11).

В случае достаточно высокой частоты квантования ($T<<T_П$) справедливо

$$\beta << 1, \quad \eta T << 1.$$

Тогда с достаточной точностью можно записать

$$e^{-\beta} \approx 1-\beta; d \approx 1-\frac{(2-\gamma)\beta}{2}; e^{-\eta T} = 1-\eta T. \tag{14}$$

С учетом этих аппроксимаций можно проводить анализ неравенств (11), (12), (13).

Случай (7) из рассмотрения исключается, так как условия (7) и (11) при $\beta << 1$ и $\eta T << 1$ одновременно выполняться не могут.

Решение двух других неравенств, (12) и (13), относительно ηT при $\beta << 1$ позволяют получить следующую зависимость степени устойчивости η от параметров импульсной САР:

$$\eta T \le \frac{\beta}{2} + \frac{\chi\beta(2-\gamma)}{4} - \sqrt{\frac{\beta^2}{4} - \beta\chi + \frac{\chi^2(2-\gamma)^2\beta^2}{16}}; \tag{15}$$

$$\eta T \le \frac{\beta}{2} - \frac{c_1 T^2 \gamma}{4m}. \tag{16}$$

Условие (15) справедливо в области значений параметров, определяемой, согласно (8), соотношением

$$\chi \le \frac{\beta}{4}.$$

При $\beta/4 < \chi < 4\left[4-(2-\gamma)\beta\right]/\beta(2-\gamma)^2$ справедливо условие (16).

Для аналогичной непрерывной САР её передаточная функция *W(p)* в разомкнутом состоянии имеет вид

$$W(p) = \frac{c}{h(T_П p + 1)p}. \tag{17}$$

Соответственно характеристическое уравнение записывается

$$1 + W(p) = 1 + \frac{c}{h(T_П p + 1)p} = 0. \tag{18}$$

Отсюда следует, что

$$p^2 + \frac{h}{m}p + \frac{c}{m} = 0. \tag{19}$$

Корни этого уравнения:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{h}{2m} \pm \sqrt{\frac{h^2}{4m^2} - \frac{c}{m}} = \frac{-h \pm \sqrt{h^2 - 4cm}}{2m}. \tag{20}$$

То есть при слабом демпфировании $h^2 - 4cm < 0$ получается следующая степень устойчивости системы:

$$\eta = \left|\frac{-h}{2m}\right| = \frac{1}{2T_П}. \tag{21}$$

В аналогичном случае импульсной системы было:

$$\eta T = \frac{T}{2T_П} - \frac{c_1 \gamma T^2}{4m}. \tag{22}$$

Очевидно, что степень устойчивости импульсной САР, определяемая выражением (22), меньше степени устойчивости аналогичной непрерывной САР и приближается к величине $1/(2T_П)$ при $T \to 0, \gamma \to 0$.

То есть степень устойчивости при импульсном регулировании приближается к величине степени устойчивости аналогичной безынерционной непрерывной САР при $T \to 0$, $\gamma \to 0$.

Типовой график зависимости максимально достигаемой степени устойчивости от величины $\chi = cT\gamma/h$ имеет вид:

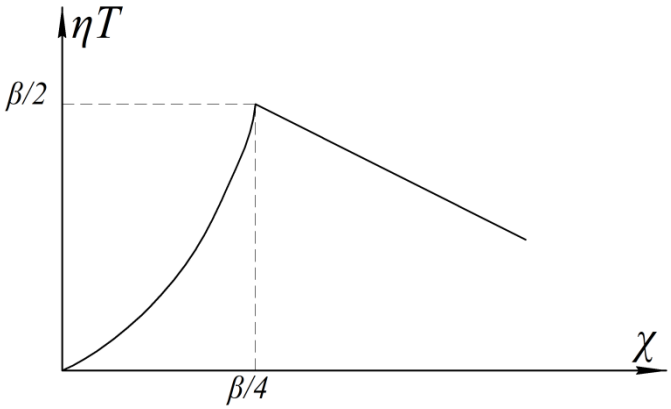


Рис. 2. Зависимость степени устойчивости η импульсной САР от величины χ, пропорциональной отношению коэффициента усиления c к коэффициенту демпфирования h; T – период квантования

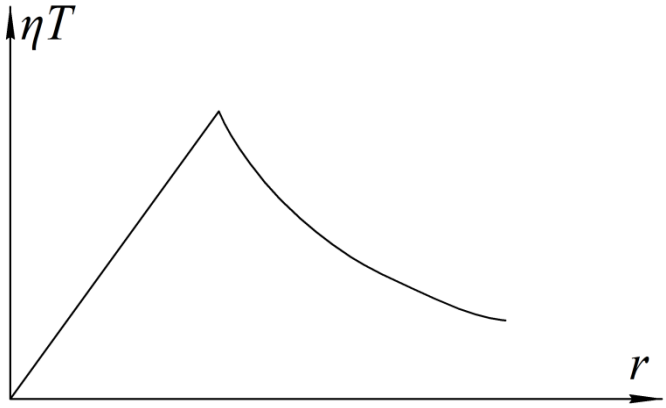


Рис. 3. Зависимость степени устойчивость η от расстояния r, аналогичная зависимости напряженности поля тяготения от расстояния до центра притяжения масс

Интересно, что полученная зависимость $\eta T(\chi)$ (рис. 2) трансформируется в известную гравитационную кривую (рис. 3), если предположить, что в области значений $\chi > \beta/4$ коэффициент усиления c (жесткость регулирования) линейно возрастает с уменьшением радиуса r, а в области $\chi < \beta/4$ жесткость регулирования изменяется обратно радиусу r.

Такая аналогия имеет место только для импульсного регулирования положением массы при указанной зависимости коэффициента усиления c (жесткости регулирования) от радиуса. Возможно, полученный результат будет полезен для обоснования соответствующей теории гравитационного взаимодействия.

Таким образом, в данной работе получены соотношения, позволяющие анализировать зависимость степени устойчивости импульсной САР от ее параметров и сопоставлять степени устойчивости импульсной и непрерывной систем регулирования положением массы.

Указаны условия, при которых зависимость степени устойчивости импульсной системы от коэффициента усиления (жесткости регулирования) трансформируется в известную гравитационную кривую.

Библиографический список

1. Цыпкин, Я. З. Теория линейных импульсных систем. М: Физматгиз. 1963. 968 с.
2. Материалы II научно-технической конференции магистрантов Рязанского государственного радиотехнического университета. Часть 2. Рязань. 2016. с.11-13.
3. Ротач В.Я. Импульсные системы автоматического регулирования. М.-Л.: Энергия, 1964. 224 с.

УДК 004.72; ГРНТИ 50.39

КРИТЕРИИ И МЕТРИКИ КАЧЕСТВА СЕТЕВЫХ СЕРВИСОВ В ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЯХ

Д.А. Перепелкин, М.А. Иванчикова, В.С. Бышов, И.Ю. Цыганов
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, dmitryperepelkin@mail.ru

Аннотация. В работе выполнен обзор основных критериев и метрик качества сетевых сервисов в программно-конфигурируемых сетях. На основе проведенного анализа установлено влияние сетевых параметров на приложения, используемые в сети.

Ключевые слова: маршрутизация, метрика, программно-конфигурируемые сети, качество сетевых сервисов.

QUALITY OF SERVICES PARAMETERS AND METRICS IN SOFTWARE DEFINED NETWORKS

D.A. Perepelkin, M.A. Ivanchikova, V.S. Byshov, I.Yu. Tsyganov
Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, Russia, dmitryperepelkin@mail.ru

Abstract. In work the review of the main parameters and metrics of quality of network services in the software defined networks is executed. On the basis of the carried-out analysis influence of network parameters on the applications used in network is established.

Keywords: routing, metrics, software defined networks, quality of services.

Быстрый рост и развитие программно-конфигурируемых сетей (ПКС) и развитие технологий передачи данных задают высокие требования к качеству обслуживания сетевых приложений (Quality of Service, QoS), высокоскоростному и надежному обмену данными между узлами телекоммуникационной системы при жестких требованиях к задержкам передачи информации. Точное определение оптимальных маршрутов передачи данных позволяет поддерживать ПКС в необходимом для пользователя состоянии.

Определение маршрута – это выбор последовательности транзитных узлов и их интерфейсов, через которые необходимо передавать данные, чтобы доставить их адресату. Определение маршрута довольно сложная задача, особенно когда конфигурация сети такова, что между парой взаимодействующих сетевых интерфейсов существует множество путей. Чаще всего выбор останавливают на одном оптимальном по некоторому критерию маршруте. В качестве критериев оптимальности могут выступать, например, время и надежность доставки данных получателю по выбранному маршруту. На практике для снижения объема вычислений ограничиваются поиском не оптимального в математическом смысле, а рационального, то есть близкого к оптимальному маршрута.

Задача выбора еще более упрощается за счет того, что при анализе критерия оптимизации учитываются далеко не все факторы, влияющие на этот критерий. Например, если искать самый лучший с точки зрения времени доставки маршрут передачи данных, на время доставки сказываются топология сети (количество транзитных узлов, которые должны пройти данные), скоростные характеристики каналов связи, их загруженность, надежность каналов и транзитных устройств, а также многие другие факторы.

В настоящее время в ПКС применяются алгоритмы маршрутизации, в которых маршрут выбирается по критерию кратчайшего расстояния. При этом расстояние измеряется в различных метриках. Метрика – это мера, используемая алгоритмом маршрутизации для вычисления наилучшего пути к любому месту назначения. Каждый алгоритм маршрутизации может использовать различные метрики [1]. Чаще всего используется простейшая метрика – количество хопов, то есть количество маршрутизаторов, которые нужно преодолеть потоку данных до сети назначения. В качестве метрик применяются также пропускная способность и надежность каналов, вносимые ими задержки и любые комбинации этих метрик.

В зависимости от типа трафика, важность того или иного критерия увеличивается (таблица 1).

Таблица 1 - Чувствительность сетевых приложений к QoS-параметрам ПКС

Тип трафика	Уровень чувствительности сетевых приложений к критериям качества сервиса (QoS)			
	Параметр 1. Пропускная способность (*Bandwidth*)	Параметр 2. Задержка передачи (*Delay*)	Параметр 3. Процент потерь пакетов (*Packet Loss Rate*, *PLR*)	Параметр 4. Джиттер (*Jitter*)
Голосовой трафик (VoIP)	Very low	High	Medium	High
Электронная коммерция (E-commerce)	Low	High	High	Low
Электронная почта (E-mail)	Low	Low	High	Low
Постоянный поиск в сети (WEB, сигнализация)	Medium	High	High	Low
Обмен файлов (HTTP, FTP)	High	Low	Medium	Low
Потоковое видео (Streaming media)	High	High	Medium	High
Мультикастинг (Multicasting)	High	High	High	High

Критерии качества сервиса или QoS-параметры в ПКС рассматриваются с двух точек зрения: производительности и надежности. Производительность подразумевает доставку потоков данных в течение заданного интервала времени. Ключевыми параметрами производительности являются: задержка передачи, джиттер, пропускная способность. Надежность определяется точностью переданных данных и процентом потерянных пакетов.

QoS-маршрутизация обеспечивает выбор маршрута следования, который удовлетворяет требованиям к качеству обслуживания конкретного потока данных. Выбираемый маршрут может отличаться от кратчайшего маршрута. Процесс определения маршрута предполагает знание требований к качеству сервиса со стороны потока данных и наличие информации о доступных сетевых ресурсов. Как правило, при определении оптимального маршрута в QoS-маршрутизации учитывается либо одна сетевая характеристика (пропускная способность канала, задержка передачи), либо их совокупность (пропускная способность и задержка, задержка и процент потери пакетов и т.д.), вместе образующих QoS-метрику [2].

В современных ПКС широко применяют и используют следующие QoS-метрики.

1. OSPF-Cost Metric – метрика, используемая в стандартном протоколе OSPF (*Open Shortest Path First*). В протоколе OSPF выбор оптимального маршрута определяется по алгоритму Дейкстры. Эта метрика, оценивающая пропускную способность канала, определяется, например, компанией Cisco, как количество секунд, необходимое для передачи 100 Мбит. Имеется следующая формула для вычисления метрики доставки информации через каналы ПКС:

$$OSPF\text{-}Cost\ Metric = 10^8 / Bandwidth. \quad (1)$$

В протоколе OSPF используется принцип контроля состояния канала (link-state protocol), а метрика представляет собой оценку эффективности связи в этом канале: чем меньше метрика, тем эффективнее организация связи. В простейшем случае метрика маршрута может равняться его длине в пересылках (hops). Но в общем случае значения метрики могут определяться в гораздо более широком диапазоне. Примеры QoS-метрики OSPF-Cost для используемых в ПКС каналов передачи потоков данных приведены в таблице 2:

Таблица 2 - Метрики OSPF-Cost

Наименование канала	**Пропускная способность канала**	**Метрика канала**
Канал 1	100 Мбит/с	1
Сеть Ethernet / 802.3	10 Мбит/с	10
Тракт E1	2,048 Мбит/с	48
Тракт T1	1,544 Мбит/с	65
Канал 2	64 Кбит/с	1562
Канал 3	56 Кбит/с	1785

2. Delay Metric – метрика, эквивалентная соответствующему QoS-параметру – задержки передачи потоков данных, измеряемой в миллисекундах.

$$Delay\ Metric = Delay. \quad (2)$$

Задержка определяется как время (t_2 - t_1) между двумя событиями – вводом пакета во входную точку сети в момент t_1 и выводом пакета из выходной точки сети в момент t_2, где ($t_2 > t_1$) и (t_2 - t_1) <= T_{max}. В общем, данный QoS-параметр определяется как время доставки пакетов между источником и получателем для всех пакетов – как успешно переданных, так и с ошибками. Речевая информация и, отчасти, видеоинформация являются примерами трафика, чувствительного к задержкам передачи данных. Когда задержка доставки пакета превышает определенные значения T_{max}, такие пакеты отбрасываются. В приложениях реального времени (VoIP) это ведет к ухудшению качества речи. Ограничения, связанные с этим параметром играют ключевую роль для успешного внедрения приложений реального времени. Этот параметр во многом определяет готовность пользователей принимать подобные приложения.

3. LARAC Metric – в данной метрике пропускная способность может оставаться неизменной, а влияние задержки передачи варьируется в зависимости от управляющего коэффициента. Данная метрика применяется при работе с такими видами трафика, как электронная коммерция, постоянный поиск в сети, потоковое видео и т.д. Метрика LARAC вычисляется по следующей формуле:

$$LARAC\ Metric = Bandwidth + \lambda * Delay, \quad (3)$$

где λ – управляющий коэффициент.

4. LARAC-Cost Metric – метрика, где влияние одного из двух QoS-параметров: задержки передачи или процента потери пакетов в канале связи преобладает над другим. Процент потери пакетов определяется как отношение суммарного числа потерянных пакетов к общему числу переданных и принятых пакетов. Эти потери возникают в сетях в том случае, если значение задержек при их передаче превышает нормированное значение T_{max}. Среди причин, вызывающих потери пакетов, необходимо отметить рост очередей в узлах сети, возникающих при перегрузке каналов связи. Данная метрика характеризует такие виды трафика, как электронная почта, обмен файлами и т.д. Метрика LARAC-Cost находится по соответствующей формуле:

$$LARAC\ Cost\ Metric = (1-\delta) * Delay + \delta * PLR, \quad (4)$$

где δ – управляющий коэффициент.

5. Composite Metric – метрика, учитывающая множество различных QoS-параметров. Существуют различные способы нахождения данной метрики, самым распространенным из которых является комбинация выше указанных критериев. Композитная метрика обычно устанавливается вручную администратором сети и, в основном, служит для отладки корректной работы алгоритмов маршрутизации.

Использование вышеуказанных QoS-метрик обеспечивают требуемые показатели качества сервиса при эффективном использовании ресурсов сети для большого набора различных приложений, включая, и наиболее критичные мультимедийные приложения реального времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук МК-6016.2016.9 и гранта РФФИ 16-47-620300 р_а.

Библиографический список

1. Корячко В.П., Перепелкин Д.А. Анализ и проектирование маршрутов передачи данных в корпоративных сетях. М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 236 с.

2. Яновский Г.Г. Качество обслуживания в сетях IP // Вестник связи. 2008. № 1. С. 65-74.

3. Enes, Hilmi, E Gilmez, Tekalp Ahmet Murat, Prof, Barı¸s Ozgür, Assoc Akan and Oznur¨ozkasap Date. “Adaptive Video Streaming over Openflow Networks with Quality of Service”. 2012. 91 p.

УДК: 004.91; ГРНТИ: 50.51

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАРШРУТНО-ОПЕРАЦИОННЫХ ТЕХПРОЦЕССОВ СБОРКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В САРР-СИСТЕМЕ T-FLEX ТЕХНОЛОГИЯ

О.В. Миловзоров
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, milovzorov_542@inbox.ru

Аннотация. В статье рассматривается методология автоматического синтеза маршрутно-операционного технологического процесса сборки печатных плат в системе T-Flex Технология. Приводится форма описания информационной модели на основе конструктивно-технологических элементов, как база для формализации алгоритма синтеза.
Ключевые слова: маршрутно-операционная технология, автоматизация проектирования, САРР-система, информационная модель, конструктивно-технологические элементы.

COMPUTER AIDED DESIGN OF ROUT AND OPERATIONAL TECHNOLOGICAL PROCESSES OF ASSEMBLY OF PRINTED CIRCUIT BOARDS IN CAPP-SYSTEM T-FLEX ТЕХНОЛОГИЯ

O.V. Milovzorov
Ryazan State Radio Engineering University,
Ryazan, Russia, milovzorov_542@inbox.ru

Absract. In article the methodology of automatic synthesis of route and operational technological process of assembly of printed circuit boards in the Technology T-Flex system is considered. The form of the description of information model on the basis of constructive and technological elements as base for formalization of a synthesis algorithm is given.
Keywords: route and operational technology, design automation, CAD-system, information model, constructive and technological elements..

Описание технологии производства на основе маршрутно-операционных технологических процессов является характерной спецификой российского машиностроительного производства. Маршрутно-операционная технология традиционно стала основой для планирования всего производственного процесса, в связи с чем внедрение самых различных средств и систем для его автоматизации в обозримом будущем не приведет к отказу от разработки маршрутно-операционной технологической документации в виде различных типов технологических карт. САРР-системы, обеспечивающие автоматизированное проектирование технологической документации этого типа также традиционно только российских разработчиков, за исключением белорусской САРР-системы Intermech.

В настоящее время на предприятиях применяется, главным образом, диалоговый метод проектирования технологической документации, что обусловлено использованием унифицированных САРР систем, таких, как Вертикаль, Adem Технология, Sprut Технология, уже упомянутая Intermech. Среди унифицированных систем отдельно можно выделить систему T-Flex Технология [3, 4, 5], содержащую в себе помимо диалоговых средства для автоматического синтеза маршрутно-операционных технологических процессов. В [1, 2, 6, 8] описана методология автоматического проектирования техпроцессов механической обработки тел вращения и корпусных деталей. Рассмотрим возможности применения данной методологии для автоматизации проектирования маршрутно-операционных технологических процессов сборки печатных плат на основе САРР-системы T-Flex Технология.

Типовой техпроцесс сборки печатных плат можно описать последовательностью следующих операций [7]:

1. Комплектовочная операция.
2. Входной контроль ИМС и ЭРЭ.
3. Входной контроль печатной платы.
4. Формовка и обрезка выводов элементов.
5. Лужение выводов ИМС и ЭРЭ.
6. Подготовка печатной платы к монтажу.
7. Установка элементов на печатную плату.
8. Флюсование.

9. Пайка.
10. Удаление флюса.
11. Контроль качества пайки.
12. Нанесение изолирующих покрытий (лакировка).

В указанную последовательность в зависимости от серийности производства и, соответственно большей или меньшей степени применения ручного труда монтажников или автоматизированного оборудования, возможно более подробное описание техпроцесса с внесением дополнительных технологических операций. Так, например, возможно введение операций закрепления соединителей, наклейки на печатную плату изолирующих прокладок под ИМС, закрепления (приклеивания) ИМС, введение операции по установке лепестков и другие. Операции для конкретного техпроцесса сборки электронного модуля будут описываться операционной технологией, содержащей последовательность технологических переходов.

Если отдельные операции всегда входят в техпроцесс, то некоторые будут входить в зависимости от особенностей конструкции печатной платы. Формирование конкретного техпроцесса осуществляется системой T-Flex Технология путем отбора из множества операций обобщенной структуры техпроцесса сборки электронных модулей, в которую необходимо ввести максимально расширенный набор сборочных операций. Данный набор может быть получен путем анализа техпроцессов сборки ограниченного числа электронных модулей, реализуемых данным цехом или участком. Возможно формирование нескольких обобщенных структур для модулей, отличающихся принципиальными отличиями, например, наличием или отсутствием моточных узлов. При отборе необходимых для техпроцесса сборки конкретного электронного модуля операций осуществляется анализ его конструкции на основе информационной модели.

Обобщенную структуру общего технологического процесса сборки представим кортежем Мо из К обобщенных технологических операций $\mathrm{O}_{\mathrm{k}}^{\mathrm{o}}$:

$$M_{\mathrm{o}} = \langle \mathrm{O}_1^{\mathrm{o}}, \mathrm{O}_2^{\mathrm{o}}, ..., \mathrm{O}_k^{\mathrm{o}}, \ ... \ , \mathrm{O}_K^{\mathrm{o}} \rangle,$$

где каждая из операций $\mathrm{O}_{\mathrm{k}}^{\mathrm{o}}$ в свою очередь описывается кортежем обобщенных технологических переходов P_{sk}^{o}:

$$\mathrm{O}_{\mathrm{k}}^{\mathrm{o}} \Rightarrow C_k^{\mathrm{o}} = \langle P_{1k}^{\mathrm{o}}, P_{2k}^{\mathrm{o}}, ..., P_{sk}^{\mathrm{o}}, ..., P_{Sk}^{\mathrm{o}} \rangle.$$

Как было показано в [1, 6, 8], основой для унификации автоматического синтеза маршрутно-операционного техпроцесса становятся конструктивно-технологические элементы (КТЭ), на основе которых выполняется формирование информационной модели объекта проектирования (в механообработке – детали, а нашем случае – электронного модуля). Обобщенные переходы P_{sk}^{o} в обобщенной структуре разделяются на два основных класса: переходы, всегда входящие в любой техпроцесс, и переходы, входящие в техпроцесс сборки отдельных модулей. Такие переходы содержат уточняющую информацию, касающуюся особенностей техпроцесса сборки конкретного электронного модуля. К переходам первого класса отнесем такие переходы, как, «Контролировать печатную плату», «Сушить электронный модуль после лакировки» и т. п.

К переходам второго класса отнесем такие переходы, как «Приклеить диэлектрические прокладки на позиционные места (далее перечень позиционных мест), установить на печатную плату ИМС (далее наименования) на позиционные места (далее перечень мест). Подобные обобщенные переходы P_{sk}^{o} привязываются к конструктивно-технологическим элементам и выбираются из обобщенной структуры в конкретный техпроцесс при наличии в информационной модели объекта соответствующего ненулевого КТЭ.

Таким образом, для применения инструментария системы T-Flex Технология для автоматического синтеза техпроцессов сборки электронных модулей необходима разработка системы КТЭ. Для техпроцессов мехобработки особенности маршрутно-операционной технологии связаны, прежде всего, с указанием последовательности обработки тех или иных поверхностей и получаемых в результате размеров и качества поверхности. Отсюда и состав КТЭ информационной модели определяется, главным образом, перечнем этих поверхностей – таких, как «наружная цилиндрическая», «отверстие», «боковая плоская», «карман», «паз» и пр.

В отличие от модели детали информационная модель электронного модуля *P* должна содержать набор элементов, позволяющих выполнить выбор из обобщенной структуры требуемых сборочных переходов, при этом технологическое действие (переход) – установка, проверка, наклейка, припаивание и др. – не требует повторений, какие обычно необходимы для обработки поверхности для достижения требуемой точности.

Представим информационную модель электронного модуля комплексным множеством *IMp* технологических элементов КТЕ$_i$, общее число которых – *I*. Каждый конструктивно-технологический элемент, в свою очередь, также представляется множеством из *J* параметров:

$$IM_p = \bigcup_{i=1}^{I} KTE_i; \qquad KTE_i = \bigcup_{j=1}^{J} p_{aj}.$$

Обобщенные переходы P_{sk}^{o}, привязанные к КТЭ$_i$, представляются в унифицированном виде с использованием шаблонов текстов переходов с разбивкой шаблона на отдельные фрагменты. Фрагменты, в свою очередь, привязываются к переменной, которая соответствует одному из параметров КТЭ$_i$ - p_{aj}. При формировании конкретного перехода маршрутно-операционной карты осуществляется присвоение переменным шаблона численных или текстовых значений на основе соответствующих параметров КТЭi информационной модели электронного модуля. Наличие присвоенного значения (численного или текстового) данной переменной является признаком выбора данного фрагмента в текст перехода. Отсутствие присвоенного значения переменной возникает, когда у КТЭi отсутствует данный параметр. Это эквивалентно тому, что данное технологическое уточнение, содержащееся в переходе, может быть пропущено и фрагмент шаблона в конкретный переход техпроцесса не попадает.

Набор КТЭ должен однозначно определять состав операций и переходов будущего техпроцесса, а набор параметров p_{aj} КТЭ$_i$. должен обеспечивать четкое формирование всех технологических указаний и информации для однозначного описания маршрутно-операционного технологического процесса.

Рассмотрим подробнее принципы формирования комплекта КТЭ. В качестве КТЭ для информационной модели прежде всего необходимо использовать укрупненный тип элементов в соответствии с перечнем элементов электронного модуля, устанавливаемых на плату: соединители, ИМС, дискретные элементы – транзисторы, диоды, резисторы, конденсаторы, реле, а также моточные элементы – трансформаторы и дроссели.

Планарные элементы, как правило, перед пайкой должны быть закреплены на плате (приклеены), в то время как дискретные элементы со штыревыми выводами могут предварительно не закрепляться.

Поскольку каждый КТЭ является инструментом выбора перехода из обобщенной структуры в конкретный техпроцесс, в набор КТЭ должны быть введены элементы, не входящие в перечень элементов, но входящие в спецификацию – крепежные элементы, диэлектрические прокладки, идентификационные гребенки, контакты и т. п..

Исходя из вышеизложенных соображений можно предложить следующий состав КТЭ:

Резистор;

Конденсатор;
ИМС;
Реле;
Соединитель;
Транзистор;
Диод;
Диэлектрическая прокладка;
Контакт;
Розетка ИМС;
Трансформатор;
Дроссель;
Лепесток.

Общими для всех КТЭ, соответствующих ЭРЭ, будут параметр NAME – наименование, N – количество. Поскольку каждый КТЭ представляет собой группу элементов, а элементы могут иметь разное наименование, целосообразно ввести нумерацию этих элементов внутри КТЭ. Например, КТЭ «Резистор» будет иметь параметры $NAME_1$, $NAME_2$, и т.д. Под именем могут подразумеваться обощенные названия серии резисторов – Р1-2Р, С2-33, С2-29 и т.д. Для микросхем это могут быть наименования серий.

Особенностью системы T-Flex Технология является наличие модуля расчетов, обеспечивающего формирование несложных алгоритмических процедур. Расчеты могут подключаться к техпроцессу в целом, отдельной операции, отдельному переходу. В частности, есть инструмент проверки логического условия, в зависимости от результата которого в техпроцесс будет включено или исключено данное технологическое действие – операция или переход. Это позволяет включать в обобщенную структуру техпроцесса сборки электронного модуля несколько альтернативных технологических действий. Например, переходы по установке ЭРЭ на диэлектрическую прокладку, или с зазором за счет формовки выводов, или с зазором за счет переменного сечения штыревого вывода. Для реализации этого инструмента в состав параметров КТЭ следует включить такие параметры, как INSTALL (способ установки – на прокладку, с зазором), CASE (тип корпуса ИМС – планарный или штыревой). Возможно введение и других аналогичных параметров.

Еще одним важным моментом, обеспечивающим правильность сборки электронного модуля, является указание о месте расположения того или иного ЭРЭ. Здесь возможно либо непосредственное перечисление позиционных мест, либо просто указание «на соответствие сборочному чертежу». Для того, чтобы соответствующая информация содержалась в КТЭ, потребуются параметры POZ и DRAW. Первый параметр – текстовый перечень позиционных мест, второй – логический, фиксирующие наличие или отсутствие указания о чертеже.

Кроме уже рассмотренных выше шаблонов текстов переходов, привязываемых к переходам, структура которых определяется содержанием информационной содели, техпроцесс будет содержать также и универсальные переходы, не подлежащие изменению. К таковым отнесем такие, как «Выполнить проверку печатной платы», «Скомплектовать ЭРЭ в соответсвтии с перечнем элементов и спецификацией», «Выполнить пайку установленных ЭРЭ», «Контролировать качество пайки» и т.д.

Шаблон обобщенного текста перехода с привязкой к переменным и разбивкой на фрагменты имеет вид:

$$\{<\text{text const}><\text{text var}_1[P_1]><\text{text var}_2[P_2]><\text{text var}_3[P_3]>\ldots<\text{text var}_k[P_k]>\},$$

где <text const> – неизменяемый текст шаблона, всегда входящий в любой конкретный переход, формируемый на базе данного шаблона;

$<\text{text var}_1[P_1]>$, $<\text{text var}_2[P_2]>$, $<\text{text var}_3[P_3]>\ldots<\text{text var}_k[P_k]>$ – фрагменты шаблона, входящие в конкретный переход только в случае, если соответсвующая привязанная переменая $P_i \neq 0$.

По умолчанию все переменные равны нулю и только после процедуры проверки параметров КТЭ$_i$ им присваиваются соответствующие значения при их наличии у КТЭ$_i$ информационной модели.

Пример такого шаблона:

{<Установить на изоляционные прокладки для установки> <микросхем [NAME$_1$],><диодных сборок [NAME$_2$],> <транзисторных сборок [NAME$_3$]>…..}.

Выводы.

Предложена методика актоматизированного проектирования маршрутно-операционных технологических процессов сборки электронных модулей в САРР-системе T-Flex Технология, основанная на общей методологии обобщенной структуры техпроцесса.

Методика позволяет в автоматизированном режиме осуществлять синтез маршрутно-операционных карт на основе общего техпроцесса сборки, представленного соответсвующим прототипом, и предварительного описания электронного модуля информационной моделью, состоящей из комплекта КТЭ$_i$.

Библиографический список

1. Миловзоров О.В., Тарабрин Д.Ю. Обобщенная структура как средство автоматизированного проектирования маршрутно-операционных технологических процессов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № S1 С.51-56.

2. Миловзоров О.В., Паршин А.Н. САПР маршрутно-операционной технологии тел вращения на базе комплекса T-FLEX // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XX Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет. 2015. С.163-165.

3. Миловзоров О.В., Паршин А.Н. Автоматизированное проектирование технологических процессов в системе T-FLEX Технология: учеб. пособие. Рязань: Рязанский институт (филиал) Университета машиностроения, 2013. 63 с.

4. Миловзоров О.В., Паршин А.Н. САПР технологических процессов: Конспект лекций: учеб. пособие. Часть 1. Рязань: Рязанский институт (филиал) Университета машиностроения, 2015. 47 с.

5. Миловзоров О.В., Паршин А.Н. САПР технологических процессов: Конспект лекций: учеб. пособие. Часть 2. Рязань: Рязанский институт (филиал) Университета машиностроения, 2015. 52 с.

6. Миловзоров О.В. Реализация принципов синтеза технологических процессов из обобщенной структуры на базе системы T-Flex Технология // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. №.54-1. С.133-138.

7. Сускин В.В. Основы технологии поверхностного монтажа : - Рязань, Изд-во Узорочье, 2001. – 160 с.

8. Миловзоров О.В. Особенности автоматизированного проектирования маршрутно-операционных технологических процессов в системе T-Flex Технология//Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2016. Сборник трудов международной научно-технической и научно-методической конференции: в 4 томах / Рязанский государственный радиотехнический университет; под общей редакцией О.В. Миловзорова. 2016. – Т. 1. – С.178-182.

СОДЕРЖАНИЕ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

Научное издание

В 8 томах

Том 4

Редактор О.В. Миловзоров

Подписано в печать 16.06.17. Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. 18,00
Тираж 100 экз. Заказ № 3337.

Рязанский государственный радиотехнический университет
Редакционно-издательский центр РГРТУ