

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ИНФОРМАТИЗАЦИИ
СОЮЗ МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СВЯЗИ РЯЗАНСКОЙ ОБЛАСТИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В.Ф. УТКИНА

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

СТНО-2026

**IX МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ**

Сборник трудов

Том 11

Рязань
2026

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

С 568

Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2026 [текст]: сб. тр. IX междунар. науч.-техн. форума: в 11 т. Т.11./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2026.

ISBN 978-5-7722-0443-6

Т.11: – 186 с.,: ил.

ISBN 978-5-7722-0457-3

Сборник включает труды участников IX Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2026.

В сборнике освещаются вопросы математического моделирования, новых технологий в радиотехнике, телекоммуникациях, электротехнике и радиоэлектронике, вопросы полупроводниковой наноэлектроники, приборостроения, лазерной, микроволновой техники, силовой промышленной электроники, новые технологии в измерительной технике и системах, биомедицинских системах, алгоритмическое и программное обеспечение вычислительной техники, вычислительных сетей и комплексов, вопросы разработки и применения элементов искусственного интеллекта в информационных системах и образовании, различные аспекты автоматизированного проектирования, обработки изображений и управления в технических системах, перспективные технологии в машиностроительном и нефтехимическом производствах, новые технологии и методики в высшем образовании, в т.ч. вопросы гуманитарной и физико-математической подготовки студентов, обучения их иностранным языкам, перспективные технологии электронного обучения, в том числе, дистанционного, вопросы экономики, управления предприятиями и персоналом, менеджмента, а также вопросы гуманитарной сферы.

Авторская позиция и стилистические особенности сохранены.

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

ISBN 978-5-7722-0443-6

ISBN 978-5-7722-0457-3

© Рязанский государственный
радиотехнический университет, 2026

ИНФОРМАЦИЯ О IX МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2026

IX Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2026 состоялся 03.03.2026-05.03.2026 в г. Рязань в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина.

В рамках форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2026 состоялась работа четырех Международных научно-технических конференций:

«Современные технологии в науке и образовании. Радиотехника и электроника», секции

- Радиотехнические системы;
- Радиотехнические устройства;
- Телекоммуникационные системы и устройства;
- Цифровые информационные технологии реального времени;
- Промышленная силовая электроника, электроэнергетика и электроснабжение;
- Физика полупроводников, микро- и наноэлектроника;
- Микроволновая, оптическая и квантовая электроника;
- Актуальные задачи химических технологий;

«Современные технологии в науке и образовании. Вычислительная техника, математическое моделирование и автоматизированные системы», секции

- Алгоритмическое и программное обеспечение вычислительных систем и сетей;
- Искусственный интеллект и информационные технологии;
- ЭВМ и системы;
- Модели искусственного интеллекта в САПР;
- Информационные технологии в конструировании электронных средств;
- Интеллектуальные системы и технологии в образовании;
- Информационные системы и защита информации;
- Математические методы и модели в научных исследованиях и прикладных проблемах. К 90-летию И.П. Карасева - основателя теории управления "в малом";
- Обработка данных, изображений и управление в технических системах;
- Геоинформационные и космические технологии;
- Автоматизация производственно-технологических процессов в приборо- и машиностроении;
- Информационно-измерительные устройства и системы в технике и медицине.
- Стандартизация и управление качеством;
- Информационные системы и технологии;

«Современные технологии в науке и образовании. Экономика и управление», секции;

- Современные технологии государственного и муниципального управления;
- Экономика, менеджмент и организация производства;
- Бухгалтерский учет, анализ и аудит;
- Экономическая безопасность;

«Современные технологии в науке и образовании. Новые технологии и методы в высшем образовании», секции

- Современные технологии электронного обучения;
- Иностранный язык в техническом вузе;
- Лингвистика и межкультурная коммуникация;
- Направления и формы гуманитаризации высшего образования и гуманитарная подготовка студентов;
- Методы преподавания и организация учебного процесса в вузе;
- Физико-математическая подготовка студентов;

- Особенности военного образования на современном этапе.

Организационный комитет Форума:

Гусев С.И., проректор по научной работе и инновациям, д.т.н., проф.;

Миловзоров О.В., зам. начальника управления организации научных исследований, к.т.н, доц. – координатор, главный редактор сборника трудов Форума;

Мионов Вал.В., профессор кафедры высшей математики, д.ф.-м.н., проф. – ответственный редактор сборника трудов Форума;

Устинова Л.С., начальник отдела информационного обеспечения – отв. за информационную поддержку;

члены оргкомитета:

Аронов Л.В., доцент кафедры радиоуправления и связи, к.т.н., доц.;

Бабаян П.В., зав. кафедрой автоматики и информационных технологий в управлении, к.т.н., доц.;

Бубнов С.А., доцент кафедры вычислительной и прикладной математики, к.ф.-м.н., доц.;

Витязев В.В., зав. кафедрой телекоммуникаций и основ радиотехники, д.т.н., проф.;

Волченков В.А., доцент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники, к.т.н.;

Горлин О.А., доцент кафедры электронных приборов, к.т.н., доц.;

Городничева Е.В., ассистент кафедры автоматизации информационных и технологических процессов;

Гостин А.М., доцент кафедры систем автоматизированного проектирования вычислительных средств, к.т.н., доц.;

Губарев А.В., доцент кафедры информационно-измерительной и биомедицинской техники, к.т.н., доц.;

Гуржин С.Г., доцент кафедры информационно-измерительной и биомедицинской техники, к.т.н., доц.;

Дмитриев В.Т., зав. кафедрой радиоуправления и связи, д.т.н., доц.;

Дмитриева Т.А., доцент кафедры вычислительной и прикладной математики, к.т.н., доц.;

Евдокимова Е.Н., зав. кафедрой экономики, менеджмента и организации производства, д.э.н., проф.;

Еремеев В.В., директор НИИ «Фотон», д.т.н., проф.;

Есенина Н.Е., зав. кафедрой иностранных языков, к.п.н., доц.;

Жулев В.И., зав. кафедрой информационно-измерительной и биомедицинской техники, д.т.н., проф.;

Каширин И.Ю., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной и прикладной математики, д.т.н., проф.;

Киселёва О.В., доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета, к.э.н., доц.;

Кислицына Т.С., старший преподаватель кафедры радиотехнических систем;

Клейносова Н.П., директор центра дистанционного обучения, к.п.н., доц.;

Клочко В.К., профессор кафедры автоматики и информационных технологий в управлении, д.т.н., проф.;

Коваленко В.В., зав. кафедрой химической технологии, к.т.н., доц.;

Корячко В.П., зав. кафедрой систем автоматизированного проектирования вычислительных средств, д.т.н., проф.;

Костров Б.В., зав. кафедрой электронных вычислительных машин, д.т.н., проф.;

Кошелев В.И., зав. кафедрой радиотехнических систем, д.т.н., проф.;

Крошилина С.В., доцент кафедры вычислительной и прикладной математики, к.т.н., доц.;

Круглов С.А., зав. кафедрой промышленной электроники, д.т.н., доц.;

Кузьмин Ю.М., доцент кафедры информационной безопасности, к.т.н., доц.;

Куприна О.Г., доцент кафедры иностранных языков, к.филол.н., доц.;

Ленков М.В., зав. кафедрой автоматизации информационных и технологических процессов, к.т.н., доц.;

Литвинов В.Г., зав. кафедрой микро- и нанoeлектроники, д.ф.-м.н., доц.;

Лукьянова Г.С., зав. кафедрой высшей математики, к.ф.-м.н., доц.;

Маметова Ю.Ф., доцент кафедры иностранных языков, к.п.н., доц.;

Мионов В.В., старший преподаватель кафедры Воздушно-космических сил;

Митрошин А.А., доцент кафедры систем автоматизированного проектирования вычислительных средств, к.т.н., доц.;

Мишустин В.Г., доцент кафедры микро- и нанoeлектроники, к.ф.-м.н., доц.;

Овечкин Г.В., зав. кафедрой вычислительной и прикладной математики, д.т.н., проф.;

Паршин А.Ю., доцент кафедры радиотехнических устройств, к.т.н., доц.;

Паршин Ю.Н., зав. кафедрой радиотехнических устройств, д.т.н., проф.;

Перфильев С.В., зав. кафедрой государственного, муниципального и корпоративного управления, д.э.н., проф.;

Подгорнова Н.А., доцент кафедры государственного, муниципального и корпоративного управления, к.э.н., доц.;

Пржегорлинский В.Н., зав. кафедрой информационной безопасности, к.т.н., доц.;

Пылькин А.Н., профессор кафедры вычислительной и прикладной математики, д.т.н., проф.;

Саблина В.А., доцент кафедры электронных вычислительных машин, к.т.н., доц.;

Сапрыкин А.Н., доцент кафедры систем автоматизированного проектирования вычислительных средств, к.т.н., доц.;

Семенов А.Р., доцент кафедры химической технологии, к.ф.-м.н.;

Скрипкина О.В. доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета, к.э.н., доц.;

Соколов А.С., зав. кафедрой истории, философии и права, д.и.н.;

Соловьева И.П., доцент кафедры экономики, менеджмента и организации производства, к.э.н., доц.;

Таганов А.И., профессор кафедры космических технологий, д.т.н., проф.;

Тарасова В.Ю., ассистент кафедры электронных вычислительных машин, магистр;

Торженова Т.В. доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета, к.э.н., доц.;

Харитонов А.Ю., нач. военного учебного центра, полковник, к.т.н., доц.;

Холопов С.И., зав. кафедрой автоматизированных систем управления, к.т.н., доц.;

Цыцына М.И., ассистент кафедры космических технологий, магистр;

Чеглакова С.Г., зав. кафедрой экономической безопасности, анализа и учета, д.э.н., проф.;

Челебаев С.В., доцент кафедры автоматизированных систем управления, к.т.н., доц.;

Щевьев А.А., доцент кафедры истории, философии и права, к.п.н., доц.

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ.
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ»**

**СЕКЦИЯ «ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА
И СИСТЕМЫ В ТЕХНИКЕ И МЕДИЦИНЕ»**

УДК 615.847.8; ГРНТИ 76.13.19

**ОЦЕНКА НЕОДНОРОДНОСТИ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ МАГНИТОТЕРАПЕВТИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ**

М.Б. Каплан

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, kaplan.m.b@iibmt.rsreu.ru*

Аннотация. Проведен численный анализ магнитных полей, формируемых магнитотерапевтическими ячейками (МЯ) аппаратов комплексного воздействия. Рассмотрены варианты ячеек с различным количеством и взаимориентацией индукторов. Основной задачей являлся выбор структуры МЯ, обеспечивающей формирование в пространстве высоконеоднородного магнитного поля, рассматриваемого в качестве ключевого биотропного параметра. Для описания степени неоднородности использованы модуль градиента модуля магнитной индукции и коэффициент вариации. Результаты подтверждают возможность управления терапевтическим эффектом за счет пространственной структуры поля.

Ключевые слова: магнитотерапевтическая ячейка, неоднородность магнитного поля.

**EVALUATION OF THE HETEROGENEITY OF THE MAGNETIC FIELD
OF A MAGNETOTHERAPEUTIC CELL**

M.B. Kaplan

*Ryazan state radio engineering university named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, kaplan.m.b@iibmt.rsreu.ru*

The summary. A numerical analysis of magnetic fields generated by magnetotherapeutic cells (MTCs) in complex devices was conducted. Cell designs with varying numbers and mutual orientations of inductors were considered. The primary objective was to select an MTC structure that would generate a highly inhomogeneous magnetic field, considered a key biotropic parameter. The degree of inhomogeneity was described using the modulus of the magnetic induction gradient and the variation coefficient. The results confirm the possibility of controlling the therapeutic effect through the spatial structure of the field.

Keywords: magnetotherapeutic cell, magnetic field non-uniformity.

Поиск эффективных конфигураций магнитных полей, оказывающих положительное терапевтическое воздействие, является основной задачей в рамках создания современных магнитотерапевтических аппаратов (МТА). В настоящее время с технической точки зрения качественный показатель лечебного воздействия магнитного поля определяется биотропными параметрами поля [1]. Таким образом, состав, взаиморасположение полеформирующих элементов, а также возможности системы управления МТА определяют потенциал магнитотерапевтического устройства по возможности формирования воздействующего магнитного поля с заданной конфигурацией. Учет характера изменения магнитного поля во времени, а также совместная с медикоментозными средствами терапия позволяют повысить качество лечения [2]. Также положительное лечебное воздействие вызывают бегущие и вращающиеся магнитные поля.

Анализируя в качестве биотропного параметра неоднородность, установлено, что наибольший биологический эффект вызывают высоконеоднородные магнитные поля. В большинстве случаев в качестве численного показателя неоднородности используют градиент

магнитной индукции. Следует обратить внимание, что магнитная индукция является вектором, поэтому в расчетах градиента используют модуль магнитной индукции $|\bar{B}|$, кроме того, не смотря на то, что градиент представляет собой вектор, сравнение полей выполняется по величине (модулю) градиента. Расчет величины градиента модуля магнитной индукции в точке определяется выражением

$$|\text{grad } |\bar{B}|| = \sqrt{\left(\frac{\partial |\bar{B}|}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial |\bar{B}|}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial |\bar{B}|}{\partial z}\right)^2}.$$

Также в качестве показателя неоднородности может быть использован коэффициент вариации модуля магнитной индукции V .

Величина коэффициента вариации определялась в соответствии с выражением:

$$V = \frac{\sigma}{|\bar{B}|_{\text{сред}}},$$

где σ – среднеквадратическое отклонение, вычисляемое для дискретного пространства следующим образом

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_u \left(|\bar{B}|_u - |\bar{B}|_{\text{сред}}\right)^2}{N}},$$

$|\bar{B}|_{\text{сред}}$ – среднее значение модуля вектора магнитной индукции в расчетной области,

$$|\bar{B}|_{\text{сред}} = \frac{\sum_u |\bar{B}|_u}{N},$$

$|\bar{B}|_u$ – модуль вектора магнитной индукции, определяемый в точке u ; N – число точек в анализируемой области.

Принципиальным отличием коэффициента вариации от модуля градиента является то, что коэффициент вариации представляет собой интегральную величину, измеряемую либо в процентах, либо в относительных единицах, который учитывает в первую очередь отличия уровня магнитного поля в точке от среднего значения. В противоположность этому градиент магнитной индукции характеризует скорость изменения магнитного поля по пространственным координатам и, как правило, имеет единицы измерения Тл/м. Кроме того градиент магнитной индукции позволяет выразить уровень неоднородности не только в области воздействия, но и в конкретной точке пространства.

В магнитотерапии магнитное поле рассматривается как потенциальное, так как в области воздействия фактически отсутствуют токи, а также области с высоким значением магнитной проницаемости. Указанный факт определяет для расчета магнитного поля использование следующего базового уравнения

$$\text{div } \bar{B} = 0.$$

В практических расчетах вычисление частных производных выполнялось численным методом, путем поиска центральной разности. Так для точки $u_i = (x = i_1 h_1, y = i_2 h_2, z = i_3 h_3)$ равномерной сетки частная производная по оси x вычислялась следующим образом

$$\frac{\partial |\bar{B}|}{\partial x} \approx \frac{1}{2h_1} \left(|\bar{B}|_{i_1-1, i_2, i_3} - |\bar{B}|_{i_1+1, i_2, i_3} \right),$$

аналогично вычислялись производные по осям y и z . Шаг сетки по всем осям выбирался один и то же. Для вычисления применялась специальная программа моделирования магнитного поля [3]. Расчет исходного распределения магнитной индукции проводился на базе скалярного магнитного потенциала.

В рамках совершенствования магнитотерапевтической техники проведен анализ структуры магнитотерапевтической ячейки (МЯ) многокомпонентного магнитотерапевтического аппарата комплексного воздействия [4]. При исследовании рассматривалась область локального действия магнитного поля МЯ. В качестве нормирующей величины использовалось пространственное распределение магнитного поля, создаваемое отдельным базовым индуктором-электромагнитом, применяемым в составе магнитотерапевтического комплекса серии «Мультимаг». Для расчета нормирующего распределения величина тока выбиралась равной 1 А, а габариты области воздействия определялись требованием формирования максимального значения поля 50 мкТл на границе области и оси индуктора. Указанная величина магнитного поля соответствует среднему значению естественного фона на поверхности Земли. Магнитное поле на оси соленоида длиной l и радиусом R в точке с координатой z определяется соотношением

$$B = \frac{\mu\mu_0 I w}{2} \frac{h}{\sqrt{R^2 + h^2}} \begin{cases} h = z + \frac{l}{2} \\ h = z - \frac{l}{2} \end{cases}$$

в связи с чем габарит области воздействия для базового индуктора определен равным 15,2 см. Кроме того минимальное расстояние между индуктором ячейки области воздействия задавалось равным 1 мм, что связано с конструктивными особенностями корпуса МЯ.

Были рассмотрены некоторые варианты МЯ, включающей от одного до трех базовых индукторов, с различной взаимориентацией (рис.). Величина питающего тока в индукторе ячейки задавалась как $\frac{1}{n}$, где n – количество индукторов ячейки, тем самым обеспечивая

фиксированную потребляемую мощность всех МЯ [5]. Для сравнения использовались такие показатели магнитного поля, как максимальные и средние значения магнитной индукции и градиента магнитной индукции в области воздействия, а также коэффициент вариации магнитной индукции (табл.). Указанные показатели вариантов структур рассчитывались относительно показателей структуры МЯ, состоящей из одного индуктора в вертикальном положении.

Результаты исследований позволили выявить следующие особенности:

- поля, создаваемые одиночными индукторами, обладают наиболее высокой степенью неоднородности;
- при использовании двух индукторов наибольшей неоднородностью обладает вариант, состоящий из одного вертикального и одного горизонтального индуктора;
- среди комбинаций из трех индукторов с позиции показателя среднего значения модуля градиента наиболее неоднородное поле создает вариант горизонтально расположенных индукторов, а при использовании коэффициента вариации – вариант из индукторов, расположенных под углом 45 градусов.

Следует обратить внимание, что структура МЯ, включающая множество индукторов, обладает расширенными функциональными возможностями при условии наличия развитого блока управления, обеспечивающего генерацию индивидуального управляющего сигнала для каждого индуктора МЯ [6]. В результате чего при формировании поля могут использоваться не все индукторы. Кроме того возможно регулировать не только значение магнитного поля в заданной точке области воздействия, но и изменять направление вектора магнитной

индукции, что обеспечивает формирование вращающихся магнитных полей, обладающих значительно выраженным биологическим эффектом.

Дальнейшие исследования предполагают анализ вариантов структуры МЯ, в которых будет определена зависимость показателей неоднородности поля от расстояния индукторов друг относительно друга, от положения индуктора относительно геометрического центра МЯ, влияние угла наклона индуктора относительно плоскости границы области воздействия. Для ответа на вопрос о предпочтительности использования конкретного показателя неоднородности магнитного поля рекомендуется провести натурный эксперимент по терапевтическому воздействию на биообъект, по результатам которого определить корреляцию между анализируемыми показателями и оказанным биологическим эффектом.

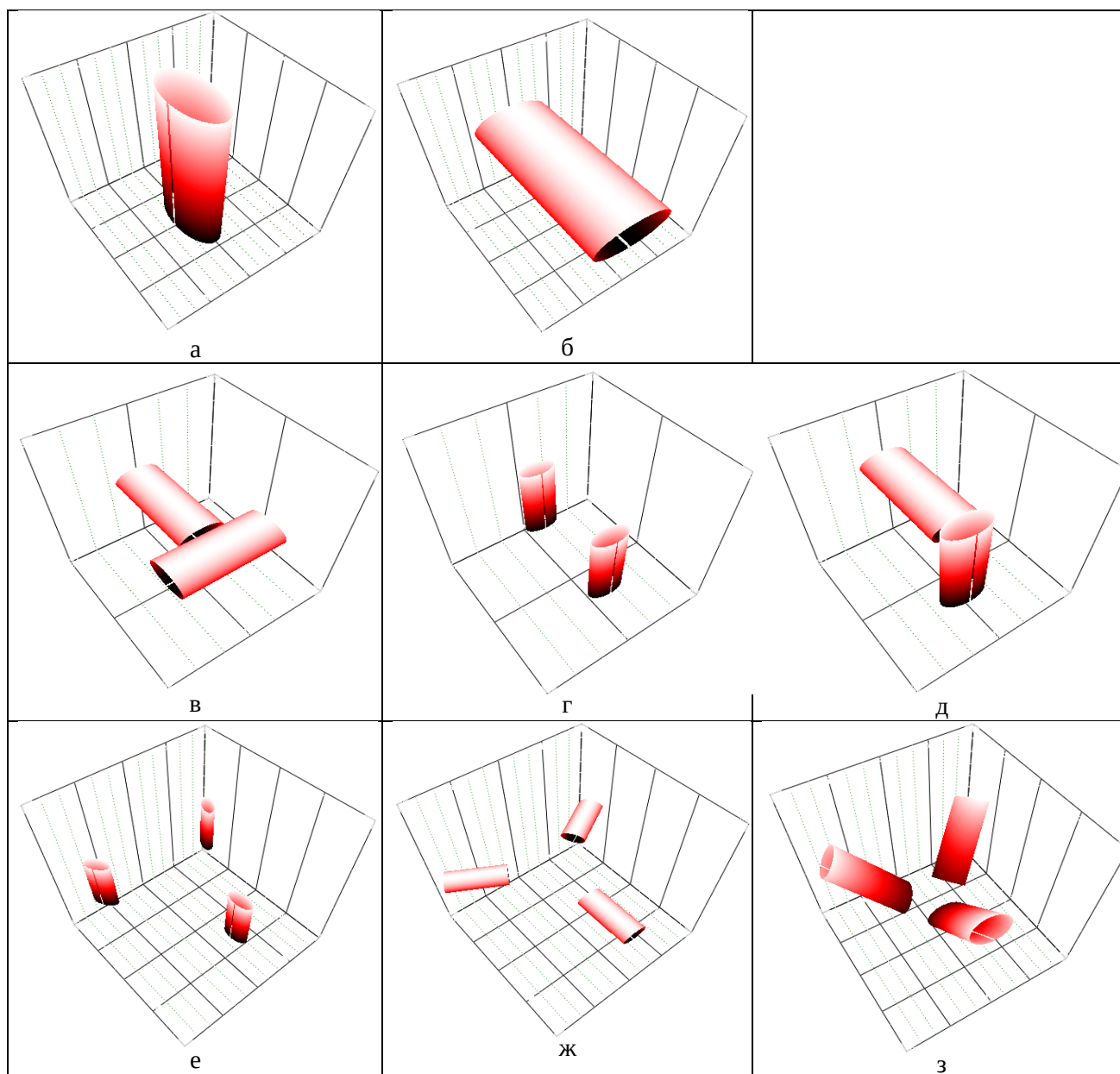


Рис. Варианты расположения индукторов-электромагнитов в магнитотерапевтической ячейке
а – один индуктор, вертикальное расположение; б – один индуктор, горизонтальное расположение; в – два индуктора, горизонтальное расположение; г – два индуктора, вертикальное расположение; д – два индуктора, горизонтально-вертикальное расположение; е – три индуктора, вертикальное расположение; ж – три индуктора, горизонтальное расположение; з – три индуктора, расположение под углом 45 градусов

Таблица Относительные показатели неоднородности магнитного поля, формируемого МЯ

№	Структура: N – количество индукторов; взаиморасположение	$ \bar{B} _{\max}$	$ \bar{B} _{\text{сред}}$	$ \text{grad } \bar{B} _{\max}$	$ \text{grad } \bar{B} _{\text{сред}}$	V
1	N = 1; вертикальное	1	1	1	1	1
2	N = 1; горизонтальное	0,645	1,173	0,627	1,155	0,727
3	N = 2; горизонтальное	0,337	0,858	0,320	0,892	0,473
4	N = 2; вертикальное	0,497	0,875	0,499	0,857	0,507
5	N = 2; горизонтально-вертикальное	0,716	0,951	0,674	0,979	0,726
6	N = 3; вертикальное	0,331	0,602	0,338	0,682	0,403
7	N = 3; горизонтальное	0,219	0,891	0,209	0,909	0,300
8	N = 3; под углом 45 градусов	0,680	0,584	1,613	0,752	0,477

Библиографический список

1. Шишло М.А. О биотропных параметрах магнитных полей // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физкультуры, № 3, 1981. – С. 61-63.
2. Саморукова О.Д., Крошили А.В., Крошили С.В., Жулева С.Ю. Задачи разработки систем медицинского назначения при выборе схемы медикаментозного лечения // Вестник РГРТУ, № 88, 2024. – С. 106-114.
3. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № RU 2024690679. Программа моделирования магнитных полей реконфигурируемой полеформирующих систем: № 2024688895: заявл. 28.11.2024; опубликовано 17.12.2024, Бюл. № 2 / М.Б. Каплан; заявитель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина».
4. Устройство для магнитотерапевтического воздействия. // Патент RU 2768467 C1, 2022. Бюл. № 9. / Гуржин С.Г., Жулев В.И., Каплан М.Б. и др.
5. Сотников А.А. Теоретические принципы и методика моделирования сигналов информационно-управляющих систем // Вестник РГРТУ, № 90, 2024. – С. 121-132.
6. Бочаров В.А., Волосатова Т.М., Филиппов М.В. и др. Декомпозиция и агрегация функциональных моделей систем // Вестник РГРТУ, № 89, 2024. – С. 85-93.

УДК 537.86:57.043; ГРНТИ 59.29.35

ВЛИЯНИЕ МОДЕЛИРУЕМОГО НИЗКОИНТЕНСИВНОГО МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 4,0-4,3 ГГц НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЛЕТОК ЗЕЛЕННОЙ ВОДОРОСЛИ

Л.П. Куришев*, П.М. Шоназаров**, С.Н. Даровских**

*МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, Москва

**Южно-Уральский государственный университет (НИУ),
Россия, Челябинск, shonazarov1991@gmail.com

Аннотация. По результатам исследований, оценивающих изменения флуоресценции хлорофилла, сделан вывод, что низкоинтенсивное электромагнитное излучение (не превышающее 100 мкВт/см^2) с естественной частотно-временной структурой в диапазоне частот 4,0-4,2 ГГц не оказывает модифицирующего воздействия на клеточную культуру зеленой водоросли *Scenedesmus quadricauda* в условиях сохраненного гомеостаза. В то же время эксперименты с ингибированием фотосинтеза в клеточном цикле водорослей показали, что воздействие микроволнового излучения с естественной частотно-временной структурой оказывает положительное влияние на его физиологическое состояние. Наблюдалось незначительное увеличение (до 5%) параметра восстановления фотосинтетической активности фотосистемы II по сравнению с контрольной. Наиболее выраженный эффект в условиях ингибирования фотосинтеза был связан с ускоренным (до двукратного) достижением контрольных значений указанного параметра при микроволновом облучении.

Ключевые слова: микроволновое излучение, солнце, водоросли, ингибирование, фотосинтез, активация, флуоресценция

EFFECTS OF SIMULATED LOW-INTENSITY SOLAR MICROWAVE RADIATION IN THE 4.0–4.3 GHz FREQUENCY RANGE ON THE PHYSIOLOGICAL PROPERTIES OF GREEN ALGAL CELLS

L.P. Kurishev*, P.M. Shonozarov**, S.N. Darovskikh**

*Lomonosov Moscow State University, Russia, Moscow

**South Ural State University (National Research University), Russia, Chelyabinsk, shonazarov1991@gmail.com

The summary. Based on the results of studies assessing changes in chlorophyll fluorescence, it was concluded that low-intensity electromagnetic radiation (not exceeding $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) with a natural frequency–time structure in the 4.0–4.2 GHz frequency range does not exert a modifying effect on the cell culture of the green alga *Scenedesmus quadricauda* under conditions of preserved homeostasis. At the same time, experiments involving inhibition of photosynthesis in the algal cell culture revealed that exposure to microwave radiation with a natural frequency–time structure has a positive effect on its physiological state. A slight increase (up to 5%) in the recovery parameter of the photosynthetic activity of photosystem II was observed compared to the control. The most pronounced effect under photosynthesis inhibition conditions was associated with an accelerated (up to twofold) achievement of control-level values of the above-mentioned parameter under microwave radiation exposure.

Keywords: microwave radiation, Sun, algae, inhibition, photosynthesis, activation, fluorescence.

Introduction

The active utilization of wavelength ranges belonging to the so-called “radio window” for solar microwave radiation (from 8 mm to 15 m) by modern radiocommunication systems [1] underlies the reduction of the evolutionarily significant role of natural electromagnetic factors in maintaining biological homeostasis [2]. One approach to mitigating the negative effects of technogenic electromagnetic radiation on living organisms involves the use of hardware–software systems for modeling solar microwave radiation with low intensity (less than $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$), comparable to the intensity of the technogenic electromagnetic background, in a frequency range (approximately 4 GHz) that is most consistent with the absorption characteristics of biological organisms [3].

Despite the availability of a substantial body of experimental data evaluating the modifying effects of simulated solar microwave radiation on biological systems [4], a clear understanding of its corrective role and the direction of its influence has not yet been established.

This determines the relevance of the present experimental study, the main objective of which is to identify the fundamental patterns of influence of simulated low-intensity solar microwave radiation in the 4.0–4.2 GHz frequency range on cellular metabolism under conditions of preserved and disrupted homeostasis.

Materials and Experimental Methods

The study was performed on cell cultures of the green alga *Scenedesmus quadricauda* cultivated on Uspensky medium No. 1 [5].

The experiments employed a hardware–software system for modeling polarized solar microwave radiation in the 4.0–4.3 GHz frequency range with a periodic ($T = 150 \text{ s}$) modulation of intensity from 10 to $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ and back [6] (Fig. 1).

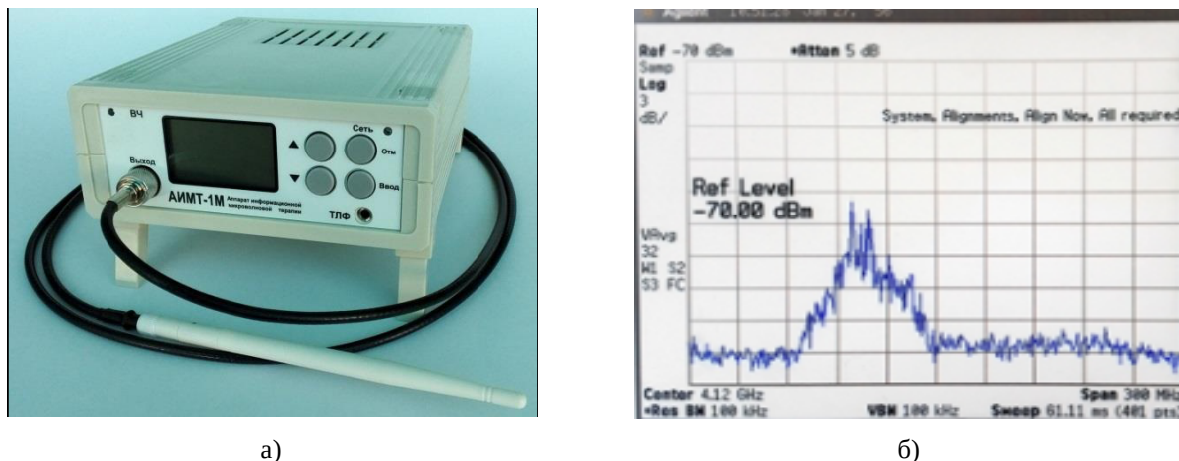


Figure 1. Device for modeling solar microwave radiation (AIMT-1) in the 4.0–4.3 GHz frequency range: (a) general view of the device; (b) its emission spectrum.

Chlorophyll fluorescence was induced using blue light with a wavelength of 455 nm at an intensity of $1000 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ for 3 s. Fast chlorophyll fluorescence parameters were assessed using a portable fluorometer, AquaPen-C AP-C 100 [7].

Two experiments were conducted involving exposure of algal cell cultures to microwave radiation generated by the above-described device. The first experiment included a comparative analysis of algal cultures exposed to microwave radiation and those not exposed. The second experiment pursued the same objective as the first but was performed on algal cultures that had been preliminarily subjected to photoinhibition.

Results of the Study

During Experiment 1, induction OJIP fluorescence curves of green algal cell cultures as a function of time were obtained (Fig. 2)

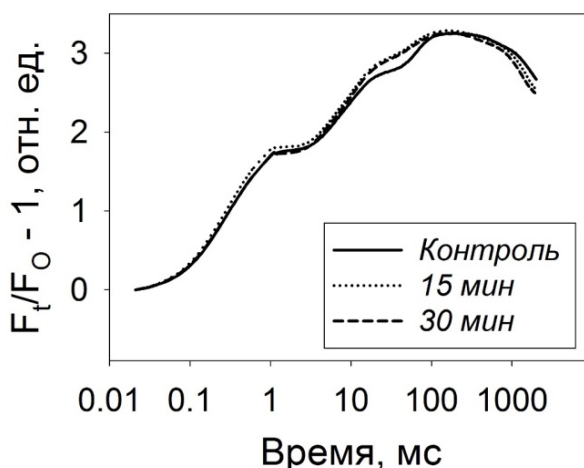


Fig. 2. Induction OJIP fluorescence curves of *Scenedesmus quadricauda* green algal cell cultures for the control and after exposure to microwave radiation for 15 and 30 min, respectively. The induction curves of the current fluorescence (F_t) were normalized to the initial fluorescence level (F_0) at $20 \mu\text{s}$.

Analysis of the induction OJIP fluorescence curves of *Scenedesmus quadricauda* green algal cell cultures for the control and after exposure to microwave radiation for 15 and 30 min indicates that the photosynthetic processes of the algal culture did not undergo significant changes in the presence of microwave radiation. The OJIP curves obtained under radiation exposure did not devi-

ate from those of the control sample. Thus, the microwave radiation applied in the experiment does not exert a modifying effect on algae in a state of preserved homeostasis. This conclusion indicates that the physiological processes of the algae are well matched with microwave radiation representing a simulated analogue of solar microwave radiation.

The result of Experiment 2 aimed at evaluating the modifying effect of simulated solar microwave radiation was an assessment of time-dependent changes in the fluorescence parameter F_v/F_m of green algal cells following their preliminary inhibition (Fig. 3).

Analysis of the obtained time dependences of the fluorescence parameter F_v/F_m during Experiment 2 (Fig. 3) and its values (Table 1) in the control and in the experiment with photoinhibition of algal cell cultures allows the following conclusions to be drawn:

1. Simulated solar microwave radiation exerts a modifying effect on the cell culture of photoinhibited algae.
2. A small increase (up to 5%) in the recovery of the photosynthetic activity parameter F_v/F_m was observed in the experiment compared with the control. This indicates stimulation of photosystem II (PSII) functioning under microwave radiation exposure relative to the control.
3. An accelerated (up to twofold) attainment of the F_v/F_m value characteristic of the control algal culture was observed in the experiment. For example, as follows from the presented time dependences of the fluorescence parameter F_v/F_m of green algal cells in the experiment and in the control (Fig. 3), as well as from its refined values (Table 1), an F_v/F_m value of 0.627 in the experiment is reached twice as fast as in the control. Similar comparisons can be made for other F_v/F_m values in the experiment and the control. In absolute terms, this time advance ranges from 15 min at the initial stage of the experiment to 60 min at its final stage.

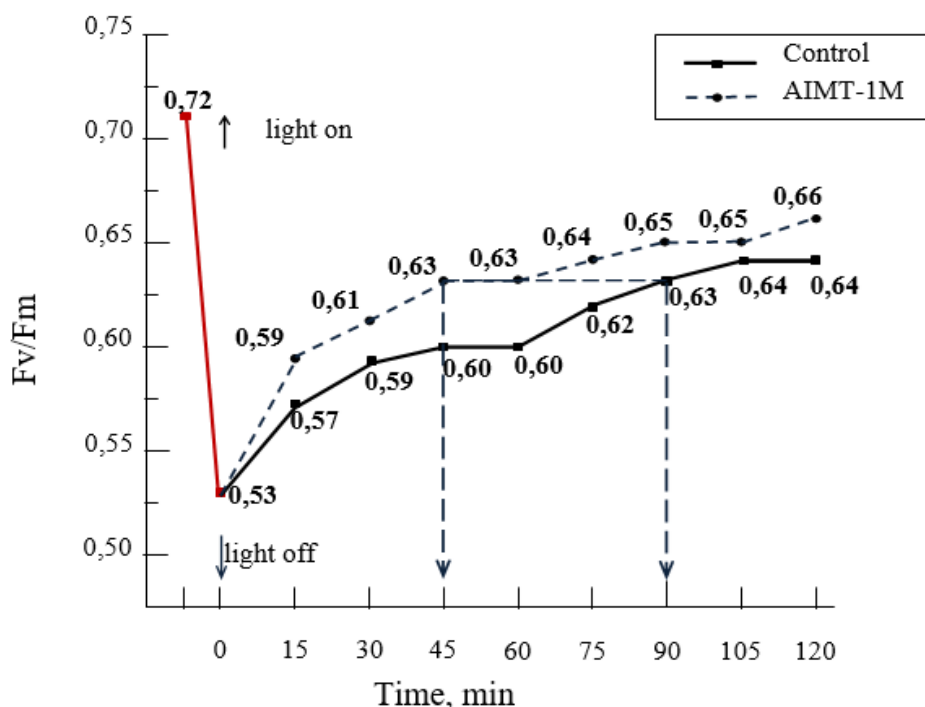


Fig. 3. Changes in the fluorescence parameter F_v/F_m in a suspension of a unicellular culture of the green alga *Scenedesmus quadricauda* in the control and in the experiment after photoinhibition under exposure to microwave radiation generated by the AIMT-1M device.

References

1. Wild, J., Smerd, S., Weiss, A. Sporadic solar radiation. *Physics-Uspekhi*, Vol. LXXXIV, No. 1, 1964, pp. 99–168.
2. Grigoriev, Yu. G. Humans in an electromagnetic field (current situation, expected biological effects, and hazard assessment). *Radiation Biology. Radioecology*, 1997, Vol. 37, No. 4, pp. 690–702.
3. Darovskikh, S. N., Vdovina, N. V., Piskorskiy, D. S. A solution to the problem of simulating solar microwave radiation to restore human homeostasis. In: *Proceedings of the International Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS)*, 2017, pp. 370–373.
4. Darovskikh, S. N., Shishkova, Yu. S., Popechitelev, E. P., et al. *Microwave heliobiology. Monograph. Chelyabinsk*, 2016, 98 p.
5. Goh, C.-H. *Photosynthesis and environments: photoinhibition and repair mechanisms in plants*. 2012.
6. Darovskikh, S. N., Shishkova, Yu. S., Vdovina, N. V., Shishkova, E. V. Comparative assessment of the modifying effects of microwave radiation of natural and anthropogenic origin on *Staphylococcus aureus*. *Biomedical Radioelectronics*, 2015, No. 3, pp. 50–55.
7. Bagaev V. N., Vdovina N. V., Gudaev N. N., Darovskikh S. N., Popechitelev E. P., Shishkova Yu. S. Device for reducing the resistance properties of microorganisms. Russian Federation Patent RU 2733579 C1, filed February 11, 2020, published October 5, 2020.

УДК 621.794.3; ГРНТИ 76.29.35

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ЯЧЕЙКИ ДЛЯ ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ТИТАНОВЫХ ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТОВ

М.С. Горовых, О.В. Мельник

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, marina04lobanova@yandex.ru*

Аннотация. Электрохимическое травление титана является ключевым этапом подготовки поверхности дентальных имплантов, обеспечивающим формирование микро- и нанорельефа, необходимого для успешной остеоинтеграции. В работе рассматриваются конструктивные особенности и требования к специализированной травильной ячейке, предназначенной для обработки титановых имплантов в кислотных электролитах. Предложена оптимизированная ячейка на основе фторопласта-4, обеспечивающая равномерное травление, минимизацию наводороживания и высокую воспроизводимость результатов. Приводятся параметры процесса и результаты апробации установки.

Ключевые слова: титановые имплантаты, электрохимическое травление, травильная ячейка, фторопласт-4, остеоинтеграция, поверхностная модификация.

DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF A CELL FOR CHEMICAL ETCHING OF TITANIUM DENTAL IMPLANTS

M.S. Gorovykh, O.V. Melnik

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Russian Federation,
Ryazan, marina04lobanova@yandex.ru*

Annotation. Electrochemical etching of titanium is a key step in preparing the surface of dental implants, ensuring the formation of micro- and nanorelief necessary for successful osseointegration. The paper discusses the design features and requirements for a specialized etching cell designed for processing titanium implants in acidic electrolytes. An optimized cell based on fluoroplast-4 is proposed, which provides uniform etching, minimization of flooding and high reproducibility of results. The process parameters and the results of the testing of the installation are given.

Keywords: titanium implants, electrochemical etching, etching cell, fluoroplast-4, osseointegration, surface modification.

Титановые сплавы являются «золотым стандартом» в дентальной имплантологии благодаря высокой биосовместимости, коррозионной стойкости и механической прочности. Однако успех остеоинтеграции имплантата определяется не только свойствами материала, но и

состоянием его поверхности. Формирование контролируемой шероховатости на микро- и наноуровне способствует адгезии остеообластов, ускорению формирования костной ткани и повышению стабильности имплантата. Одним из эффективных методов модификации поверхности является химическое травление, позволяющее создавать заданную топографию без механических напряжений и загрязнений [1].

Ключевым элементом установки для химического травления является ячейка, конструкция которой определяет равномерность обработки, воспроизводимость результатов и безопасность процесса. В данной работе представлена разработка и оптимизация ячейки для травления титановых имплантов, учитывающая особенности процесса, химическую агрессивность электролитов и требования к качеству поверхности.

Травление титана отличается от обработки других металлов необходимостью удаления не только окислы, но и склонностью материала к наводороживанию в кислотных средах. Это явление приводит к охрупчиванию и снижению усталостной прочности имплантата, что недопустимо в медицинских применениях [2].

Для травления титана используются преимущественно кислотные электролиты на основе агрессивных кислот, а именно плавиковой, соляной, серной и азотной. Процесс происходит без действия тока.

Целью работы является разработка установки травления титановых дентальных имплантов, которая позволит обеспечить воспроизводимость экспериментальных данных.

Разработанная нами ячейка на рисунке 1 предназначена для лабораторных исследований и малотоннажного производства.

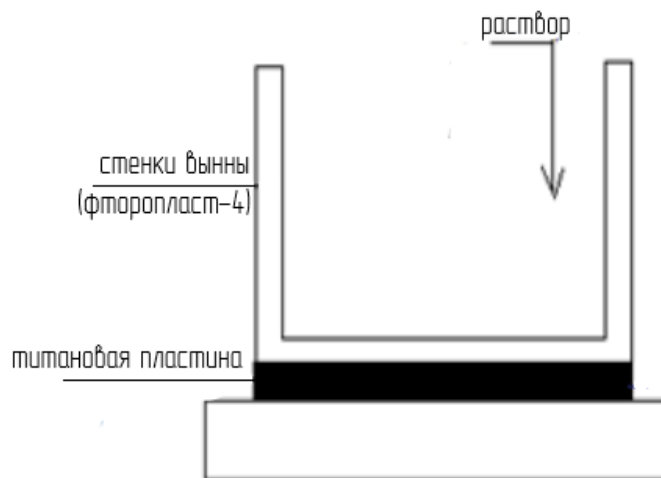


Рис. 1. Ячейка для травления титана

Основой ячейки, представленной на рисунке 1, является ванна из материала фторопласт-4. Материал ванны был выбран потому, что он имеет химическую стойкость к плавиковой и другим минеральным кислотам, рабочий диапазон температур: от -60 до $+200$ °С, низкая адгезия, легкая очистка, а так же механическая прочность и долговечность.

Габариты ячейки подбираются под типовые размеры дентальных имплантов (диаметр 3–5 мм, длина 8–16 мм), допускается групповая обработка нескольких образцов [3].

Для оценки эффективности разработанной травильной ячейки были проведены сравнительные эксперименты с использованием стандартной ячейки открытого типа и предложенной оптимизированной ячейки из фторопласта-4. В качестве объектов исследования использовались образцы из титана марки ВТ1-0. Все образцы перед травлением проходили стандартную подготовку: обезжиривание в ацетоне и промывку дистиллированной водой.

Электролит для травления готовился на основе 4% водного раствора плавиковой кислоты (HF). Процесс проводился при постоянной температуре 40 ± 1 °С. Время травления составляло 20 минут для всех серий экспериментов.

После травления образцы последовательно промывались в трех емкостях с дистиллированной водой (каждое промывание по 2 минуты) и высушивались в потоке инертного газа при температуре 80 °С в течение 15 минут.

Качество поверхности оценивалось по равномерности травления – визуально и с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) по отсутствию зон с резким контрастом микрорельефа; по микро- и нанотопографии – с использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ) для измерения шероховатости (S_a , S_z) и параметров пористости; по степени наводороживания – косвенно оценивалась по результатам микротвердости (метод Виккерса, нагрузка 50 г) на поперечных шлифах. Повышение микротвердости более чем на 10% относительно нетравленого образца считалось признаком существенного наводороживания по воспроизводимости – определялось как процентное соотношение количества образцов, у которых параметры S_a и S_z укладывались в диапазон $\pm 15\%$ от среднего значения по серии из 10 образцов.

Проведенный СЭМ-анализ показал, что в оптимизированной ячейке формируется однородный микрорельеф по всей поверхности образца. На рисунке 2 представлено типичное СЭМ-изображение поверхности образца, обработанного в разработанной ячейке. На изображении видна равномерная пористая структура с микронеровностями.

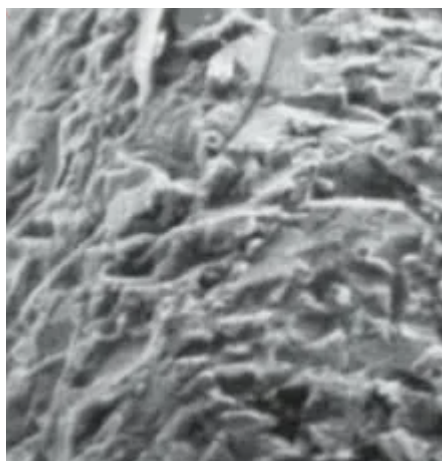


Рис. 2. СЭМ-изображения поверхности титана после травления в предложенной ячейке из фторопласта-4

Количественные данные, полученные методом АСМ, сведены в таблицу 1. Анализ данных подтверждает, что использование фторопластовой ячейки позволяет получать более контролируруемую и воспроизводимую топографию поверхности.

Таблица 1. Сравнительные характеристики поверхности после травления

Параметр	Разработанная ячейка
Средняя шероховатость, S_a , мкм	2.1 ± 0.2
Максимальная высота неровностей, S_z , мкм	16.0 ± 1.5
Диаметр нанопор, нм	50–200
Воспроизводимость, %	93
Прирост микротвердости, %	3–5

Полученные результаты демонстрируют ключевые преимущества разработанной ячейки:

1. Повышенная воспроизводимость 93% достигнута за счет стабильного температурного поля, равномерного доступа свежего электролита ко всей поверхности образца и инертной среды материала ячейки, препятствующей побочным реакциям.

2. Минимизация наводороживания подтверждается незначительным приростом микротвердости (3–5%). Это объясняется эффективным удалением пузырьков водорода с поверхности образца за счет геометрии ячейки и перемешивания, что предотвращает их повторную адсорбцию и диффузию в титан.

3. Формирование целевой топографии: полученный диапазон микрошероховатости ($S_a \sim 2.1$ мкм) и нанопористости (50–200 нм) оптимален для адгезии и пролиферации остеобластных клеток, что подтверждается данными литературы [1, 3].

Основным фактором, способствующим равномерности травления, является материал фторопласт-4. Его полная химическая инертность в агрессивной среде исключает загрязнение электролита продуктами коррозии самой ячейки. Кроме того, низкая адгезия фторопласта к солям и продуктам реакции облегчает очистку и поддерживает постоянство условий от эксперимента к эксперименту.

Библиографический список

1. Ушаков А.И. Исследование поверхностей дентальных имплантатов. – М., 2014.
2. Крикуненко А.С. Исследование поверхности титана при химическом травлении во фторсодержащих средах. – Томск, 2013.
3. Родионов И.В. Создание биосовместимых покрытий на медицинских титановых имплантатах анодированием. – Перспективные материалы, 2008.

УДК 615.47:004.932:681.2 ГРНТИ 76.29.35

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕБЕНКА В ИНКУБАТОРЕ БЕСКОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Д.Ш. Гилязиев

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ,
Российская Федерация, Казань, shamilevich2003@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается разработка бесконтактной системы автоматического мониторинга температуры новорожденных в условиях неонатального инкубатора. Актуальность задачи обусловлена необходимостью создания безопасных и комфортных условий для выхаживания маловесных и недоношенных детей, для которых критически важен постоянный контроль терморегуляции без нарушения стабильной среды кувеза.

Рассмотрены три наиболее встречающихся метода отслеживания положения новорожденного для автоматического наведения. Более подробно рассмотрена схема на основе компьютерного зрения с применением модуля ESP32-CAM и библиотеки OpenCV для обработки видеопотока в реальном времени, включая описание архитектуры системы и принципов управления сервоприводами.

Ключевые слова: неонатальный инкубатор, бесконтактный мониторинг температуры, инфракрасная термометрия, компьютерное зрение, ESP32-CAM, OpenCV.

SYSTEM FOR MONITORING THE TEMPERATURE OF A CHILD IN AN INCUBATOR USING A CONTACTLESS METHOD AND COMPUTER VISION TECHNOLOGIES

D.S. Gilyaziev

*Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI,
Russian Federation, Kazan, shamilevich2003@mail.ru*

Abstract. The paper discusses the development of a non-contact automatic monitoring system for newborns in a neonatal incubator. The relevance of the task is due to the need to create safe and comfortable conditions for the care of low-weight and premature infants, for whom constant monitoring of thermoregulation is critical without disrupting the stable environment of the incubator.

Three most common methods of tracking the position of a newborn for automatic guidance are considered. A more detailed description of a computer vision-based scheme using the ESP32-CAM module and the OpenCV library for real-time video stream processing is provided, including a description of the system architecture and servo control principles.

Keywords: neonatal incubator, non-contact temperature monitoring, infrared thermometry, computer vision, ESP32-CAM, OpenCV.

Согласно данным Всемирной Организации Здравоохранения, ежегодно в мире рождается до 30 млн маловесных и требующих специализированной медицинской помощи детей [1].

Неонатальный инкубатор или кувез – это устройство, создающее безопасные условия для выхаживания новорожденных, особенно недоношенных детей и младенцев с низкой массой тела.

Инкубатор оснащен необходимым набором функций, создающих оптимальные условия для роста и развития ребенка, и помогающих медицинскому персоналу проводить максимальное количество лечебных мероприятий и различных манипуляций без изъятия новорожденного из благоприятной для него среды [2].

Опасными состояниями для новорожденного с низкой массой тела и неразвитой системой терморегуляции являются состояния гипо- и гипертермии.

В данной статье рассмотрена бесконтактная система контроля температуры в инкубаторе для новорожденных.

Существуют различные методы оценки температуры новорожденных:

- а) Ректально – в прямой кишке (норма для новорожденного 37,6 – 38°C);
- б) Орально – во рту (норма для новорожденного 35,5 – 37,2°C);
- в) Темпорально – у височной артерии на лбу (норма для новорожденного 35,5 – 37,5°C);

г) Аксиллярно – в подмышечной впадине (норма для новорожденного 36,3 – 37,3°C);

д) Тимпанически – в ухе (норма для новорожденного 35,8 – 38°C) [3].

При этом контактные методы зачастую доставляют дискомфорт новорожденным и персоналу, приводят к нарушению микроклимата инкубатора, поскольку необходимо производить различные манипуляции и предварительную подготовку к данным процедурам. Исходя из этого, предлагается производить измерения бесконтактным методом с помощью инфракрасного датчика. Однако для датчика необходима термокомпенсация, так как ИК-термометрия основана на регистрации энергетической светимости нагретых объектов.

Преобразование температуры и энергетической светимости выполняется с использованием уравнения Стефана-Больцмана.

$$W = \sigma \cdot T^4$$

$$T = \sqrt[4]{\frac{W}{\sigma}}$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана (равная $5.670367 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{ K}^4$)

В статье «Высокоточная инфракрасная термография в инкубаторе для новорожденных» журнала «Общество биомедицинской инженерии» авторов: Кейсуке Хамада Эйдзи Хиракава, Хидецугу Асано, Хаято Хаяши, Шахта Такаси, Тацуки Итикава, Ясухино Нагата рассмотрена температурная компенсация для ИК термометров.

При использовании инфракрасной термометрии внутри конвективного неонатального инкубатора излучение окружающих источников ($W_{ист}$) равно излучению атмосферы ($W_{атм}$) из-за равномерной температуры в инкубаторе. Следовательно, излучение от объекта, обнаруженное ИКТ ($W_{обн1}$), может быть получено из уравнения (1):

$$W_{об} = \frac{W_{обн1} - W_{ист}}{\epsilon_{об} \cdot \tau_{атм}} + W_{ист} \quad (1)$$

Здесь прозрачность атмосферы ($\tau_{атм}$) рассчитывается по уравнениям (2) и (3).

$$\tau(d, \omega) = K_{атм} \cdot \exp[-\sqrt{d}(x_1 + \beta_1 \cdot \sqrt{\omega})] + (1 - K_{атм}) \cdot \exp[-\sqrt{d}(x_2 + \beta_2 \cdot \omega)] \quad (2)$$

$$\omega(\omega\%, T_{атм}) = \omega\% \cdot \exp(h_1 + h_2 \cdot T_{атм} + h_3 \cdot T_{атм}^3 + h_4 \cdot T_{атм}^3), \quad (3)$$

где τ – пропускание атмосферы;

$K_{атм}$ – масштабный коэффициент атмосферного затухания;

d – расстояние от ИКТ;

x_1 и x_2 – коэффициенты затухания для атмосферы без водяного пара;

β_1 и β_2 – коэффициенты затухания для водяного пара;

ω – коэффициент, указывающий содержание водяного пара в атмосфере;

$\omega\%$ – относительная влажность;

коэффициенты h_1, h_2, h_3, h_4 в уравнении (3) – эмпирические коэффициенты, используемые для расчёта коэффициента содержания водяного пара в атмосфере.

Для регистрации инфракрасного излучения необходима точная юстировка датчика температуры на ребенка, для этого предлагается применять два сервопривода вращающих датчик по осям X и Y.

Для регистрации положения ребенка можно использовать различные методы.

1) Использование ультразвукового датчика расстояния.

Преимущества:

- низкая стоимость;

- реагируют на движения вне зависимости от материала, в который облачен объект.

Недостатки:

- на работу ультразвуковых датчиков могут влиять температура и влажность окружающей среды, что приводит к снижению точности измерений;

- датчики, принцип работы которых основан на отражении звуковых волн, более чувствительны к шероховатости поверхности объекта измерения, по причине того, что шероховатость поверхности объекта может привести к затуханию или рассеиванию отраженной волны, снижая точность измерения.

- ультразвуковые датчики в процессе работы могут подвергаться воздействию помех окружающей среды, таких как механическая вибрация, электромагнитные помехи [4].

2) Применение инфракрасной термографии и регистрация картинка в виде теплового излучения.

Преимущества:

- детальная картина теплового излучения ребенка;

- безопасность для ребенка.

Недостатки:

- высокая стоимость;

- влияние среды и объектов [5];

3) Использование камеры и программ для компьютерного зрения.

Преимущества:

- сравнительно невысокая стоимость;
- позволяет точно корректировать угол поворота;
- не зависит от температуры и влажности;
- безопасен для ребенка.

Недостатки:

- сложность реализации.

Таким образом, предлагается использование системы компьютерного зрения для юстировки датчика температуры ребенка посредством двух сервоприводов. На рисунке 1 изображена блок-схема устройства, содержащая инфракрасный датчик температуры новорожденного, модуль камеры, фиксирующий изображение, микроконтроллер, средство отображения измеренной температуры (жидкокристаллический дисплей) и сервоприводы 1 и 2 для вращения модуля с камерой и датчиком температуры по координатам X и Y соответственно.

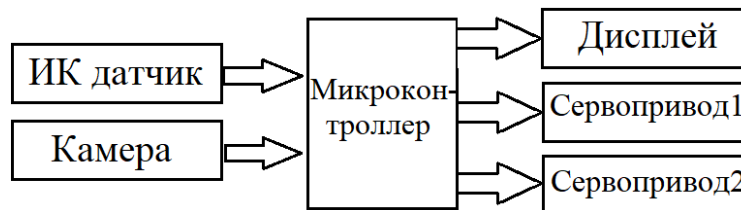


Рис. 1. Блок-схема системы контроля температуры ребенка

Для данных целей лучше всего подходит модуль ESP32-CAM – это контроллер с 32-битной архитектурой, имеющий встроенную оперативную память SRAM объемом 520 КБ и внешнюю PSRAM объемом 4 МБ. Модуль содержит также датчик камеры OV2640, способный захватывать изображения с разрешением до 1600x1200 пикселей.

Есть поддержка GPIO-контактов, включает интерфейсы UART, SPI, I2C, ШИМ (PWM), АЦП (ADC) и ЦАП (DAC), что обеспечивает широкие возможности подключения датчиков [6].

Главным преимуществом данного модуля является поддержка библиотеки OpenCV, предназначенной для компьютерного зрения в реальном времени. Также присутствует возможность интеграции с нейросетью YOLO, но это требует дополнительных вычислительных мощностей.

OpenCV – это библиотека программирования, в первую очередь предназначенная для компьютерного зрения в реальном времени, изначально разработанная Intel, а в настоящее время поддерживаемая как бесплатное и открытое программное обеспечение под лицензией Apache 2. Библиотека содержит более 2500 алгоритмов и управляется некоммерческим фондом Open Source Vision Foundation [7].

Библиографический список

1. Всемирная организация здравоохранения//Каждый год почти 30 миллионов больных и недоношенных новорожденных отчаянно нуждаются в лечении. – URL: <https://www.who.int/ru/news/item/13-12-2018-nearly-30-million-sick-and-premature-newborns-in-dire-need-of-treatment-every-year?ysclid=ml9g10chzm244196430> (дата обращения: 07.02.2026).;
2. Tiara Medical//Как выбрать кувез для недоношенных детей– URL: <https://www.tiaramed.ru/advice/kak-vybrat-kuvez-dlya-nedonoshennykh-detey/?ysclid=mlc2t7szqj50706489> (дата обращения: 07.02.2026).;
3. Медива //Как мерить температуру у грудничков правильно. – URL: <https://mediva83.com/articles/kakaya-temperatura-dolzha-byt-u-rebenka-v-1-mesyats> (дата обращения: 07.02.2026).;
4. Niubol//Недостатки ультразвукового датчика. – URL: <https://www.niubol.com/Product-knowledge/disadvantages-of-ultrasonic-sensor.html> (дата обращения: 07.02.2026).;

5. Современные проблемы науки и образования// Медицинское тепловидение – современные возможности метода 2011 № 4. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=4726> (дата обращения: 07.02.2026).;

6. Med About me//Бесконтактная диагностика: плюсы и минусы термографии. – URL: https://medaboutme.ru/articles/beskontaktnaya_diagnostics_plyusy_i_minusy_termografii/ (дата обращения: 07.02.2026).;

7. Think Robotics//Computer Vision with OpenCV on ESP32-CAM: Building Intelligent Vision Systems. – URL: <https://thinkrobotics.com/blogs/learn/computer-vision-with-opencv-on-esp32-cam-building-intelligent-vision-systems> (дата обращения: 07.02.2026).;

УДК 681.88; ГРНТИ 47.55.31

УСТРОЙСТВО ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

Т.Д. Абдиматова

АО «Академия гражданской авиации»,

г. Алматы, Республика Казахстан, t.abdimatova@agakaz.kz

Аннотация. Акустические методы широко применяются при диагностике авиационной техники, однако возможности применяемых диапазонов ограничены диапазоном слышимых частот, что затрудняет выявление дефектов на ранних стадиях. Переход к ультразвуковому диапазону позволяет повысить чувствительность к мелким повреждениям, но требует создания портативных и недорогих измерительных средств, устойчивых к интерференции и шумам. В работе представлено описание разработанного портативного широкополосного ультразвукового микрофонного комплекса (УЗМК) для пеленгации источников ультразвукового излучения с визуализацией их положения на фотоизображении. Комплекс включает четырёхканальную широкополосную микрофонную решётку для диапазона от 20 до 80 кГц, малощумящие усилители, АЦП с частотой дискретизации 500 кГц и программный модуль обработки сигналов. Предложенное решение многочастотной обработки обеспечивает снижение влияния интерференции, повышение помехоустойчивости и точности пеленгации источника, что подтверждает перспективность его применения для ранней диагностики авиационной техники.

Ключевые слова: ультразвуковая диагностика, акустический мониторинг, авиационная техника, интерференция, пеленгация источника, неразрушающий контроль.

DEVICE FOR DETECTING ULTRASONIC SIGNALS

T.D. Abdimatova

JSC "Academy of Civil Aviation",

Almaty, Republic of Kazakhstan, t.abdimatova@agakaz.kz

Annotation. Acoustic methods are widely used in the diagnosis of aviation equipment, but the capabilities of the ranges used are limited by the range of audible frequencies, which makes it difficult to detect defects at an early stage. The transition to the ultrasonic range makes it possible to increase sensitivity to minor damage, but requires the creation of portable and inexpensive measuring instruments that are resistant to interference and noise. The paper describes the developed portable broadband ultrasonic microphone system for direction finding of ultrasonic radiation sources with visualization of their position on a photographic image. The complex includes a four-channel broadband microphone array for the range from 20 to 80 kHz, low-noise amplifiers, an ADC with a sampling frequency of 500 kHz and a signal processing software module. The proposed multi-frequency processing solution reduces the influence of interference, increases noise immunity and accuracy of the direction finding of the source, which confirms the capability of its use for early diagnostics of aviation equipment in the future.

Keywords: ultrasound diagnostics, acoustic monitoring, aviation technology, interference, source direction finding, non-destructive testing.

Введение

Существуют различные методы диагностики состояния элементов техники. Методы основываются на различных физических принципах. Выбор того или иного физического принципа зависит от цели и задач диагностики. К примеру, акустический метод диагностики

проявляет свою эффективность в задачах выявления нарушения герметичности, наличия повреждений во вращающихся элементах техники, наличия трещин в твердых предметах и т.д. В частности, в диагностике авиационной техники акустические методы являются неотъемлемой частью диагностики и неразрушающих методов контроля. Однако существующие акустические методы в силу ограничения применяемых крайних частот ограничены в возможности диагностики элементов авиационной техники на ранней стадии зарождения дефектов. С увеличением частоты акустического сигнала снижается длина волны, предоставляющая возможность исследовать мелкие повреждения, излучающие более короткие волны относительно слышимых акустических волн. Таким образом, применение ультразвуковых методов диагностики в авиационной технике позволило бы открыть новое направление более эффективного выявления дефектов на ранней стадии. Необходимым условием для этого является появление портативных устройств ультразвукового измерения.

В статье [1] автор привел возможные технические требования к характеристикам перспективного прибора для ультразвуковой диагностики механизмов. Основными требованиями были широкополосность, портативность и недороговизна.

Ультразвуковые волны, как и всякие волновые явления подвержены эффекту интерференции. В связи с этим при разработке устройства предъявлялись требования к возможности снижения влияния эффекта интерференции.

Существует множество работ, посвященных борьбе с интерференцией, связанной с применением волн различной природы. Рассмотрим различные варианты решения задачи подавления эффекта интерференции, связанных с акустическими волнами.

В работе [2] авторы разработали и апробировали систему анализа сигналов акустической эмиссии и сил резания для мониторинга состояния процесса механической обработки. В статье сложная интерференционная структура сигналов, обусловленная наложением источников акустической эмиссии, шумами и нелинейной динамикой резания, рассматривалась как основной фактор, затрудняющий достоверную диагностику. Для учета и подавления влияния интерференции применялись методы спектрального анализа с отбором информативных частотных компонент, объединение признаков нескольких сенсоров, а также методы нелинейного анализа временных рядов (корреляционная размерность, показатели Ляпунова, энтропийные характеристики). Это позволило отделить детерминированную динамику процесса от шумовых и интерференционных составляющих и обеспечить надежную классификацию формы стружки, степени износа инструмента и момента возникновения автоколебаний.

В работе [3] авторы представили обзор и систематизацию методов ранней диагностики неисправностей асинхронных двигателей на основе анализа звука и акустической эмиссии. В статье интерференция фонового шума, наложение сигналов от различных источников и затухание высокочастотных компонент рассматривались как основные мешающие факторы, снижающие достоверность измерений. Для уменьшения влияния интерференции в анализируемом исследовании предлагалось применять предварительную фильтрацию и подавление шума, спектральный и вейвлет-анализ, эмпирическое модальное разложение, энтропийные показатели, а также методы машинного и глубокого обучения для выделения информативных признаков. Такой комплексный подход позволял отделить дефектные акустические сигнатуры от шумовой и интерференционной составляющей, повысить диагностическую чувствительность и обеспечить раннее обнаружение дефектов подшипников, ротора и статора даже при низком отношении сигнал/шум.

В работе [4] авторы разработали и экспериментально апробировали интегрированный метод измерения акустических сигналов в условиях шумовой среды при определении глубины динамического уровня жидкости в нефтяной скважине. В статье интерференция отражённых акустических волн, фоновый промышленный шум и наложение посторонних сигналов рассматривались как основные мешающие факторы, искажающие временные и амплитудные

параметры полезного сигнала. Для подавления интерференционных влияний предложено применение комбинированной цифровой обработки, включающей фильтрацию, спектральный анализ, корреляционные и адаптивные методы выделения информативной составляющей. Это позволило повысить устойчивость измерений к шуму, обеспечить более точное определение времени прихода отражённого сигнала и повысить достоверность оценки глубины динамического уровня жидкости.

В работе [5] авторы разработали и экспериментально апробировали новый класс тестовых сигналов для акустических измерений. Метод предназначен для измерения импульсных характеристик, нелинейных искажений и оценки влияния фонового шума в реальных акустических условиях. В работе интерференция отражённых сигналов, спектральное наложение компонент и влияние фонового шума рассматривались как основные факторы, ограничивающие точность традиционных. Для подавления интерференции предложено использовать сигналы с высокой степенью спектральной гибкости и взаимной ортогональности. Конволюция измеренного отклика с временно-инвертированной копией сигнала обеспечивает импульсную компрессию и выделение линейной составляющей системы, а различие между откликами позволяет оценивать нелинейные компоненты. Спектральное формирование тестового сигнала под характеристики фонового шума повышает устойчивость измерений и улучшает отношение сигнал/шум в условиях зашумлённой среды.

Проведя итоговый анализ рассмотренных публикаций, можно заключить, что многие решения требуют применения сложной схемы или алгоритмов обработки. Учитывая требование по недороговизне портативного ультразвукового устройства, такие решения являются излишними.

В данном докладе я сообщаю о разработке портативного, недорогого широкополосного устройства измерения уровня ультразвукового сигнала с простым методом подавления эффекта интерференции с возможностью пеленгации, разработанного для задач диагностики. Подавление интерференции достигнуто благодаря применению многочастотной обработки результатов измерений.

Описание разработанного устройства для ультразвуковой диагностики

На рисунке 1 представлен общий вид устройства. Конструктивно устройство представлено в виде прямоугольно перекрещенных панелей, установленных на треноге, на концах которых расположены микрофоны.

Устройство совместно с системой обработки и отображения результатов измерения представляет собой ультразвуковой микрофонный комплекс (УЗМК) предназначенный для пеленгации источника излучения и отображения его на фотографии в виде цветного маркера.

Работа комплекса основана на использовании результатов измерения ультразвуковых колебаний, распространяющихся в воздушной среде, и определении местоположения источника излучения на фотоизображении.

Ультразвуковой сигнал принимается микрофонами, усиливается, оцифровывается, полученный результат обрабатывается компьютером. Фотографирование осуществляется модулем камеры, расположенным между ультразвуковыми датчиками, на равном расстоянии и на одной плоскости. Цветной-маркер выставляется наложением на изображение источника излучения в результате программной обработки.



Рис. 1. Общий вид устройства

В состав ультразвукового микрофонного комплекса входят:

- штатива с креплением микрофонной решетки и модуль камеры;
- 4 ультразвуковых микрофона;
- 4 микрофонных усилителя;
- аналогово-цифровой преобразователь – АЦП;
- блок питания;
- персональный компьютер - ПК.

В качестве микрофонов выбраны малошумящие микрофоны SPU0410LR5 QB-7 с высокой чувствительностью и с высоким динамическим диапазоном. В корпусе микрофонов имеются собственные встроенные усилители. Микрофоны предназначены для приема ультразвуковых колебаний в заданном диапазоне частот от 20 до 80 кГц.

Размещение микрофонов произведено на крестообразном устройстве. Расстояние между микрофонами изменяемое.

Модуль камеры обладает высокой разрешающей способностью, с контролем качества изображения и с углом обзора объектива 120° без искажений.

Микрофонные усилители собраны на малошумящей микросхеме AD8397ARZ, с высоким коэффициентом усиления и динамическим диапазоном.

Для устранения влияния шумов от высоких частот преобразователя напряжения выбрана схема блока питания на трансформаторе.

АЦП имеет четыре идентичных канала для преобразования принятых и усиленных аналоговых ультразвуковых сигналов в оцифрованный сигнал. Тактовая частота работы 500 кГц.

ПК применяется для записи и обработки полученных результатов в виде оцифрованных сигналов. Запись и обработка производится разработанной программой Ultra SonicSignal.exe

В результате обработки получают данные о сигнале: дата, время, амплитуда, длительность, уровень сигнала и получение местоположения источника ультразвука на фото в поле обзора УЗМК.

Заключение

Переход к ультразвуковому диапазону повышает чувствительность диагностики и позволяет выявлять дефекты авиационной техники на ранней стадии. Основной ограничивающий фактор – интерференция и фоновый шум были преодолены применением многочастотной обработки результатов измерений.

Разработанный портативный ультразвуковой микрофонный комплекс с частотой дискретизации 500 кГц обеспечивает помехоустойчивую регистрацию в широком диапазоне частот (от 20 до 80 кГц) и пеленгации источников излучения без применения сложных алгоритмов обработки. Устройство является перспективным средством для задач ранней диагностики и неразрушающего контроля, в частности в авиационной отрасли.

Библиографический список

1. Абдиматова, Т.Д.; Васильев, И.В. Требования к характеристикам перспективного прибора для ультразвуковой диагностики механизмов. Вестник Академии Гражданской Авиации 2025, 3(38), 32-46. https://doi.org/10.53364/24138614_2025_38_3_3
2. Govekar, E.; Gradišek, J.; Grabec, I. Analysis of acoustic emission signals and monitoring of machining processes. Ultrasonics 2000, 38(1-8), 598-603. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(99\)00126-2](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(99)00126-2)
3. AlShorman, O.; Alkahatni, F.; Masadeh, M.; Irfan, M.; Glowacz, A.; Althobiani, F.; Kozik, J.; Glowacz, W. Sounds and acoustic emission-based early fault diagnosis of induction motor: A review study. Advances in Mechanical Engineering 2021, 13(2). <https://doi.org/10.1177/1687814021996915>
4. Luping, W.; Yong, W.; Yuxiang, W.; Qiang, C.; Ping, L.; Xiaofei, C. Research on comprehensive and effective acoustic signal processing methods for calculating downhole liquid level depth. Measurement 2022, 199, 111452. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111452>
5. Kawahara, H.; Sakakibara, K.-I.; Mizumachi, M.; Banno, H.; Morise, M.; Irino, T. Frequency domain variant of Velvet noise and its application to acoustic measurements. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.04301>

УДК 681.883; ГРНТИ 47.55.31

СОЗДАНИЯ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ПРИБОРА ДЛЯ ПОИСКА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАТУР

А.А. Рысбекова

*АО «Академия гражданской авиации»,
г. Алматы, Республика Казахстан, a.rysbekova@agakaz.kz*

Аннотация. В работе рассматривается проблема негативного влияния интерференции ультразвуковых волн на точность измерения и локализации источников ультразвуковых сигналов. Представлен опытный образец портативного прибора для поиска и направления на ультразвуковые сигнатуры, ориентированный на задачи ранней диагностики авиационной техники и акустического мониторинга. В отличие от существующих дорогостоящих решений, разработанное устройство сочетает широкополосный ультразвуковой микрофон, направляющий акустический раструб, усилительный тракт и цифровую обработку на базе микроконтроллера ESP32, что позволяет реализовать простое и энергоэффективное реше-

ние по снижению влияния интерференционных и шумовых искажений. Описаны конструктивные особенности прибора, принцип работы и функциональные возможности, включая преобразование ультразвуковых сигналов в слышимый диапазон и спектральную индикацию. Полученные результаты подтверждают возможность применения разработанного устройства для обнаружения и локализации источников ультразвука в условиях ограниченных вычислительных ресурсов и повышенного уровня помех.

Ключевые слова: ультразвук, интерференция, акустический мониторинг, локализация источника, портативный детектор, диагностика авиационной техники.

DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE DEVICE FOR DETECTING ULTRASONIC SIGNATURES

A.A. Rysbekova

JSC "Academy of Civil Aviation",
Almaty, Republic of Kazakhstan, a.rysbekova@agakaz.kz

Annotation. The paper addresses the problem of the negative influence of ultrasonic wave interference on the accuracy of measurement and localization of ultrasonic signal sources. A prototype of a portable device for detecting and direction finding of ultrasonic signatures is presented, intended for early diagnostics of aviation equipment and acoustic monitoring applications. Unlike existing expensive solutions, the developed device combines a broadband ultrasonic microphone, a directional acoustic horn, an amplification stage, and digital signal processing based on the ESP32 microcontroller, enabling a simple and energy-efficient approach to reducing interference and noise distortions. The design features, operating principle, and functional capabilities of the device are described, including frequency conversion of ultrasonic signals into the audible range and spectral visualization. The obtained results confirm the feasibility of using the developed device for detecting and localizing ultrasonic sources under conditions of limited computational resources and increased noise levels.

Keywords: ultrasound, interference, acoustic monitoring, source localization, portable detector, aviation equipment diagnostics.

Введение

В докладе на конференции [1] было отмечено о возможном присутствии опасности на организм человека ультразвуковых источников шума. Опасность заключается в неведении об их присутствии из-за невозможности их восприятия органами слуха человека. Наличие недорогих широкополосных устройств для измерения ультразвуковых сигналов открыла бы новое направление для исследования присутствия их источников и анализа их характеристик. В данном докладе сообщается о разработке прототипа такого устройства. В ТОО СКТБ «Гранит» было разработано широкополосное портативное направленное устройство для измерения ультразвуковых источников сигнала, позволяющее благодаря этим свойствам определять направление на источники и даже их локализовать.

Ультразвуковые сигналы, как и всякие волновые явления при распространении в пространстве проявляют, в частности, эффект интерференции. Данное свойство является одним из больших препятствий для корректного измерения сигнала, соответственно приводящее к ложным выводам на основе их обработки. При разработке устройства усилия были направлены на преодоление эффекта интерференции с поиском возможного простого решения.

Проблеме интерференции посвящено много работ. Работы делятся в зависимости от физической природы рассматриваемых волн и цели исследования.

Рассмотрим ряд работ, посвященных рассмотрению эффекта интерференции при измерении акустических волн, частным случаем которых являются ультразвуковые сигналы.

В работе [2] авторы решают проблему искажения интерференционной картины при линейном интегрировании давления лазерным лучом, исследуя влияние геометрии источника и сопоставляя экспериментальные данные лазерной доплеровской виброметрии с конечно-элементным моделированием, что позволило подтвердить корректность реконструкции интерференционных эффектов.

В работе [3] авторы решают проблему сложной и дорогостоящей обработки интерференционных картин, предлагая метод согласованной интерференционной структуры (MIS), который фильтрует всю поверхность акустической интенсивности на основе модельных интерференционных закономерностей и аналитических выражений, что повышает разрешение и позволяет работать при более низком отношении сигнал/шум.

В данной статье [4] авторы решают проблему роста ошибки при увеличении расстояния до источника, вводя теоретическую модель интерференционной структуры с учётом профиля скорости звука и сопоставляя измеренную и моделируемую интерференционные картины, что позволяет оценивать глубину источника даже в удалённой зоне прямого прихода.

Подытоживая рассмотренные работы, можно прийти к выводу, что проблема интерференции пагубно влияет на корректное проведение измерений акустических сигналов, соответственно приводя к невозможности локализации источников сигналов. Исследователи предлагают различные решения в зависимости от области применения. Некоторые решения требуют усложнения конструкции устройства, наличия сложных алгоритмов обработки и соответственно необходимости большой вычислительной мощности. Для задачи создания недорогих и портативных устройств для локализации источников ультразвуковых сигналов необходимо применение более простого решения.

При разработке устройства в качестве прототипа было использовано устройство UM9000. Данное устройство предназначено для измерения акустических сигналов, в частности, ультразвуковых. К недостаткам устройства относительно задачи измерения источников ультразвуковых сигналов и их портативной локализации относится дороговизна этого устройства.

Нами была поставлена задача разработки недорогого устройства с теми же характеристиками с возможностью простого решения эффекта интерференции.

На рисунке 1 представлена электрическая схема устройства.

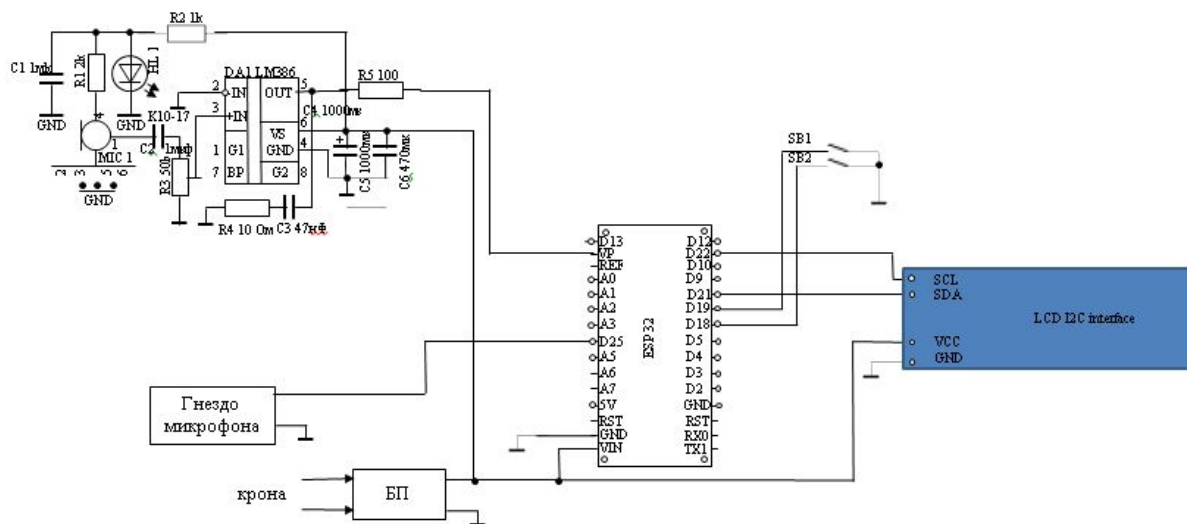


Рис. 1. Схема ультразвука детектора

Описание ультразвукового детектора

Разрабатываемый ультразвуковой детектор предназначен для обнаружения, регистрации и анализа источников ультразвуковых колебаний в окружающей среде. Прибор обеспечивает преобразование ультразвуковых сигналов в слышимый диапазон частот, что позволя-

ет оператору осуществлять субъективную оценку наличия и направления источника ультразвука с использованием наушников и показаний электронного дисплея.

Устройство может применяться при проведении исследовательских, диагностических и поисковых работ, включая задачи акустического мониторинга, экспериментальные исследования, а также учебные и демонстрационные цели.

Функционально ультразвуковой детектор состоит из следующих основных узлов:

- ультразвуковой микрофон;
- усилитель сигнала;
- микроконтроллерный модуль на базе ESP32;
- модуль отображения информации (ЖК-дисплей 2×16 с интерфейсом I²C);
- блок питания на основе литий-ионных аккумуляторов;
- органы управления и индикации;
- акустический выход (гнездо для наушников);
- механический корпус с направляющим раструбом.

Принцип работы прибора заключается в приёме ультразвуковых колебаний микрофоном, их усилении и последующей обработке микроконтроллером. После обработки сигнал преобразуется в звуковую форму слышимого диапазона и подаётся на наушники оператора.

В качестве первичного преобразователя используется ультразвуковой микрофон, чувствительный к колебаниям в ультразвуковом диапазоне частот до 80 кГц. Для повышения направленности и селективности приёма перед микрофоном установлен акустический раструб, выполненный в виде полый трубы.

Использование раструба позволяет:

- повысить чувствительность к сигналам, поступающим с заданного направления;
- улучшить пространственное разрешение;
- упростить определение направления на источник ультразвука за счёт увеличения интенсивности сигнала при наведении.

Сигнал, поступающий с микрофона, имеет малую амплитуду и требует предварительного усиления. Для этого используется аналоговый усилитель на базе микросхемы LM386, обеспечивающий необходимый коэффициент усиления при сохранении формы сигнала и минимизации искажений. Усиленный сигнал далее поступает на вход микроконтроллера.

Центральным элементом устройства является микроконтроллер ESP32, обладающий достаточной вычислительной мощностью и встроенными периферийными модулями для обработки аналоговых сигналов.

Функции микроконтроллера включают:

- оцифровку входного сигнала;
- программную обработку ультразвуковых данных;
- преобразование ультразвуковой частоты в слышимый диапазон;
- формирование аудио сигнала для вывода на наушники;
- управление пользовательским интерфейсом;
- отображение информации на экране.

Для повышения удобства эксплуатации реализована возможность регулировки частоты выходного звукового тона. Пользователь может изменять её с помощью кнопок управления, увеличивая или уменьшая частоту в слышимом диапазоне для более комфортного восприятия сигнала.

Для взаимодействия с пользователем прибор оснащён следующими элементами управления и индикации:

- кнопка включения питания;
- кнопки увеличения и уменьшения частоты выходного тона;
- жидкокристаллический дисплей формата 2×16 символов с интерфейсом I²C;
- световой индикатор включенного питания;

- гнездо для подключения наушников.

Дисплей используется для отображения текущих параметров работы прибора, включая уровень FFT спектра по каждой обнаруженной частоте. Применение интерфейса I²C позволило сократить количество соединительных проводников и упростить компоновку устройства.

Для прослушивания преобразованного сигнала предусмотрено стандартное гнездо для подключения наушников. Это позволяет использовать различные типы наушников в зависимости от предпочтений оператора и условий работы. Применение наушников также снижает влияние внешнего шума и повышает точность восприятия сигнала.

Питание устройства осуществляется от трёх литий-ионных аккумуляторов типоразмера 18650, что обеспечивает достаточную автономность работы и высокую энергетическую ёмкость.

Для стабилизации напряжения используется понижающий DC-DC преобразователь, принимающий входное напряжение от 5 В до 14 В и формирующий несколько уровней питания:

- 5 В для питания усилителя;
- 3,3 В для питания микроконтроллера ESP32 и жидкокристаллического дисплея.

Использование импульсного преобразователя повышает энергоэффективность системы и снижает тепловые потери.

Все электронные компоненты размещены в корпусе, изготовленном методом 3D-печати. Такой подход позволил оптимизировать форму корпуса с учётом эргономических и функциональных требований.

Конструкция корпуса включает:

- основное отделение для электронных модулей и элементов питания;
- переднюю часть с отверстием для ультразвукового микрофона и раструба;
- рукоятку для удобного удержания прибора одной рукой;
- посадочные места для кнопок, дисплея и разъёмов.

Наличие рукоятки существенно повышает удобство эксплуатации, особенно при длительной работе и необходимости точного наведения на источник ультразвука.

Разработанный ультразвуковой детектор представляет собой портативное электронное устройство, сочетающее в себе чувствительный приём ультразвуковых сигналов, гибкую цифровую обработку и удобный пользовательский интерфейс. Применение микроконтроллера ESP32, автономного питания и направленного акустического раструба обеспечивает функциональность, мобильность и эргономичность прибора.

Конструкция устройства допускает дальнейшую модернизацию, включая расширение диапазона рабочих частот, добавление FFT спектра с возможностью записи обнаруженного сигнала в реальном времени, вывод точной даты и реализацию дополнительных режимов индикации и анализа сигнала.

Заключение

В ходе работы разработан и апробирован опытный образец портативного прибора для обнаружения и локализации ультразвуковых сигнатур. Проведённый анализ существующих исследований показал, что интерференция ультразвуковых волн существенно снижает точность измерений и может приводить к ошибкам в определении направления и параметров источника. Предложенное конструктивно-алгоритмическое решение, основанное на направленном приёме сигнала, усилении и цифровой обработке с использованием микроконтроллера ESP32, позволило минимизировать влияние интерференционных эффектов без усложнения аппаратной части и увеличения вычислительной нагрузки.

Разработанный прибор обладает мобильностью, автономностью и возможностью дальнейшей модернизации, включая расширение спектрального анализа и регистрацию сигналов в реальном времени. Полученные результаты подтверждают перспективность использования устройства для задач ранней диагностики авиационной техники, акустического мониторинга и образовательных исследований.

Библиографический список

1. Рысбекова, А.А. Локализация источников опасного ультразвукового излучения. VIII Международный научно-технический форум СТНО-2025. Сборник трудов. Том 6, 274-278.
file:///C:/Users/HUAWEI/Downloads/%D0%A2%D0%BE%D0%BC%206%20%D0%A1%D0%A2%D0%9D%D0%9E-2025%20%D0%90%D0%B9%D0%BD%D0%B0%D1%80%D0%B0%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F.pdf
2. Robert Malkin.; Thomas Todd.; Daniel Robert. Quantitative imaging of acoustic reflection and interference. Journal of Physics: Conference Series 581 (2015) 012007.
https://www.researchgate.net/publication/272825353_Quantitative_imaging_of_acoustic_reflection_and_interference
3. Duan R. et al. A performance study of acoustic interference structure applications on source depth estimation in deep water //The Journal of the Acoustical Society of America. – 2019. – Т. 145. – №. 2. – С. 903-916.
<https://doi.org/10.1121/1.5091100>
4. Yubo Qi.; Shihong Zhou.; Changpeng Liu. Sources depth estimation for a tonal source by matching the interference structure in the arrival angle domain. J. Acoust. Soc. Am. 154, 2800–2811 (2023).
<https://doi.org/10.1121/10.0022253>

УДК 537.86:57.043; ГРНТИ 59.29.35

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОИНТЕНСИВНЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА КОЖУ, КРОВЬ, МЫШЦЫ И МОЗГ ЧЕЛОВЕКА

П.М. Шоназаров*, С.Н. Даровских

Южно-Уральский государственный университет (НИУ),
Россия, Челябинск, *shonazarov1991@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты математического моделирования и оценка воздействия микроволновых и акустических сигналов низкой интенсивности на ткани человека. Актуальность исследования вызвана разработкой аппаратно-программного устройства моделирования характеристик естественной микроволновой солнечной радиации.

Исследуются характеристики прохождения микроволнового электромагнитного излучения в органах человека. Численное моделирование взаимодействия между микроволновой радиацией и биологическими тканями выполнено с использованием удельного коэффициента поглощения электромагнитной энергии (specific absorption rate – SAR). Полученные результаты могут быть использованы при разработке терапевтических методов лечения с применением низкоинтенсивного микроволнового излучения.

Ключевые слова: микроволновая радиация, акустические сигналы, биологические ткани, математическое моделирование, электромагнитные поля, удельный коэффициент поглощения электромагнитной энергии.

MODELING AND COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE EFFECTS OF LOW-INTENSITY MICROWAVE AND ACOUSTIC SIGNALS ON HUMAN SKIN, BLOOD, MUSCLE, AND BRAIN TISSUES

P.M. Shonazarov*, S.N. Darovskikh

South Ural State University (National Research University),
Russia, Chelyabinsk, *shonazarov1991@gmail.com

Abstract. This article presents a mathematical modeling and comparative evaluation of the effects of low-intensity microwave and acoustic signals on human biological tissues. The relevance of the

study is determined by the need to develop hardware–software systems capable of modeling the characteristics of natural microwave radiation of the Sun.

The paper examines the features of propagation of electromagnetic waves in the microwave frequency range in biological tissues. Numerical modeling of the interaction between microwave radiation and biological tissues was performed using the specific absorption rate (SAR) parameter. The obtained results can be used in the development of therapeutic methods for influencing biological tissues using low-intensity microwave radiation.

Keywords: microwave radiation; acoustic signals; biological tissues; mathematical modeling; electromagnetic fields; specific absorption rate (SAR)

Introduction

The study of the interaction of electromagnetic waves with biological tissues is an important area of modern biophysics and medical physics [6,10,11]. In recent years, there has been a significant increase in interest in investigating the effects of low-intensity electromagnetic signals on biological systems [4–6].

Natural microwave radiation of the Sun plays an important role in the processes of interaction between electromagnetic fields and biological organisms. However, under modern conditions its regulatory influence has been significantly weakened due to the increasing level of electromagnetic pollution in the environment.

A number of studies have shown that modeling the parameters of solar microwave radiation can be used to investigate its modifying effects on biological objects [2–4].

In this regard, an important task is the development of hardware systems capable of modeling the parameters of microwave radiation of natural origin and using them for therapeutic purposes [1].

The aim of this study is the mathematical modeling and comparative evaluation of the effects of low-intensity microwave and acoustic signals on human biological tissues.

Microwave Radiation Modeling Device

Within the framework of this study, a device for modeling solar microwave radiation AIMT-1 is used (fig. 1), which is designed to generate electromagnetic radiation in the microwave frequency range [5].

The operating frequency range of the device is 4.0–4.3 GHz, which corresponds to the microwave radiation band. The power density of the radiation does not exceed $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, which corresponds to the level of low-intensity microwave exposure.

The device makes it possible to generate microwave signals with parameters close to the characteristics of natural solar microwave radiation.



Fig. 1. Device for modeling solar microwave radiation (AIMT-1)

The duration of a single exposure is 15–20 minutes, which corresponds to the therapeutic operating modes of the device used in medical applications.

Mathematical Model of Microwave Exposure

The propagation of electromagnetic waves in biological tissues is described by Maxwell's equations [6]. For a harmonic electromagnetic signal, the electric field can be represented by the following expression

$$E(t) = E_0 \cos(2\pi f_c t) \quad (1)$$

where E_0 – amplitude of the electric field;
 f_c – carrier frequency;
 t – time.

The power density of the electromagnetic field is determined by the following expression

$$S = \frac{E^2}{2\eta}, \quad (2)$$

where S – power density of the electromagnetic field;
 η – wave impedance of the medium.

The absorption of electromagnetic energy by biological tissues is characterized by the specific absorption rate (SAR)

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho}, \quad (3)$$

where σ – electrical conductivity of the tissue;
 ρ – tissue density.

Mathematical Model of Acoustic Exposure

Acoustic signals propagate in biological tissues in the form of mechanical pressure waves. The propagation of acoustic waves is described by the wave equation [8]:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p \quad (4)$$

where p – acoustic pressure;

c – speed of sound propagation in the medium.

The solution of this equation for a harmonic wave can be written as

$$p(t) = p_0 \cos(2\pi f_a t), \quad (5)$$

where p_0 - acoustic pressure;

f_a - speed of sound propagation in the medium.

The solution of this equation for a harmonic wave can be written as

$$I = \frac{p^2}{2\rho c}, \quad (6)$$

where I - acoustic intensity;

ρ - density of the medium;

c - speed of sound in the medium.

Numerical Modeling

To analyze the interaction of microwave and acoustic signals with biological tissues, numerical modeling was performed using the **Python programming language**.

The following parameters were used in the simulation.

Table 1. Numerical modeling parameters

Parameter	Value
Microwave signal frequency	4 GHz
Power density	100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Tissue conductivity	0.8 S/m
Tissue density	1050 kg/m^3

In numerical modeling of the interaction of electromagnetic waves with biological tissues, an important parameter is the **density of the medium**. The density of human biological tissues is defined as the mass of a substance per unit volume and is denoted by the symbol ρ .

Table 2. Electrophysical parameters of biological tissues

Tissue	Density ρ (kg/m^3)	Conductivity (σ) (sm/m)	Relative permittivity (ϵ)
Skin	1100	0.9	41
Blood	1060	1.2	61
Muscle	1040	0.8	52
Brain	1030	1.0	50

As shown in Table 2, different types of biological tissues are characterized by different electrophysical parameters, which influence the processes of propagation and absorption of electromagnetic radiation. In particular, an increase in the electrical conductivity of tissue leads to an increase in the level of absorption of electromagnetic energy.

To model the interaction of microwave radiation with biological tissues, electrophysical parameters characteristic of the **microwave frequency range** were used. The main tissue parameters are presented in Table 2.

For soft tissues of the human body, the density typically ranges from **1000 to 1100 kg/m^3** . In particular, the density of blood is approximately **1060 kg/m^3** , muscle tissue **1040 kg/m^3** , and brain tissue about **1030 kg/m^3** . Since the considered model includes several types of soft biological tissues (skin, blood, muscles, and brain), an averaged density value is used in the calculations:

$$\rho = 1050 \text{ кг/м}^3 \quad (7)$$

This value is widely used in **biophysical and biomedical models** describing the interaction of electromagnetic radiation with human body tissues [1–3].

Results of Modeling

To analyze the characteristics of microwave radiation generated by the **solar microwave radiation modeling device AIMT-1**, numerical modeling of the time dependence of the electric field of the microwave signal was performed. The simulation was carried out for a carrier frequency of **4 GHz**, corresponding to the operating range of the developed device.

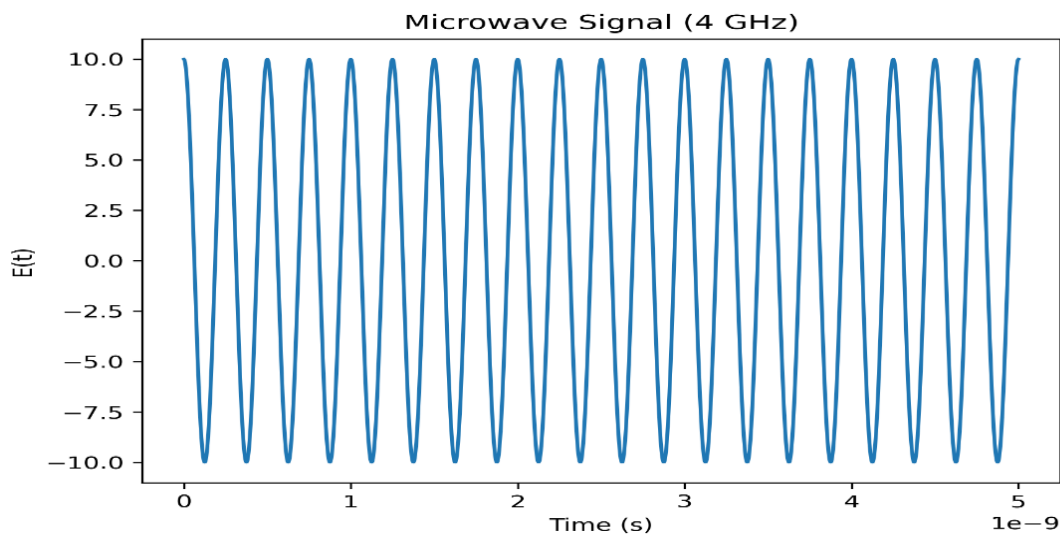


Fig. 2. Time dependence of the microwave signal with a carrier frequency of 4 GHz

As shown in Fig. 2, the microwave signal has a periodic harmonic variation of the electric field strength. The obtained time dependence corresponds to the parameters of electromagnetic radiation generated by the AIMT-1 device in the frequency range 4.0–4.3 GHz.

It should be noted that the high oscillation frequency of the electric field corresponds to the microwave frequency band used in microwave therapy. The obtained simulation results make it possible to use this signal for further analysis of the processes of electromagnetic energy absorption in biological tissues.

To evaluate the absorption of electromagnetic energy by biological tissues, numerical modeling of the temporal variation of the specific absorption rate (SAR) was performed. The calculations were carried out for a microwave signal with a frequency of 4 GHz, corresponding to the operating range of the AIMT-1 device.

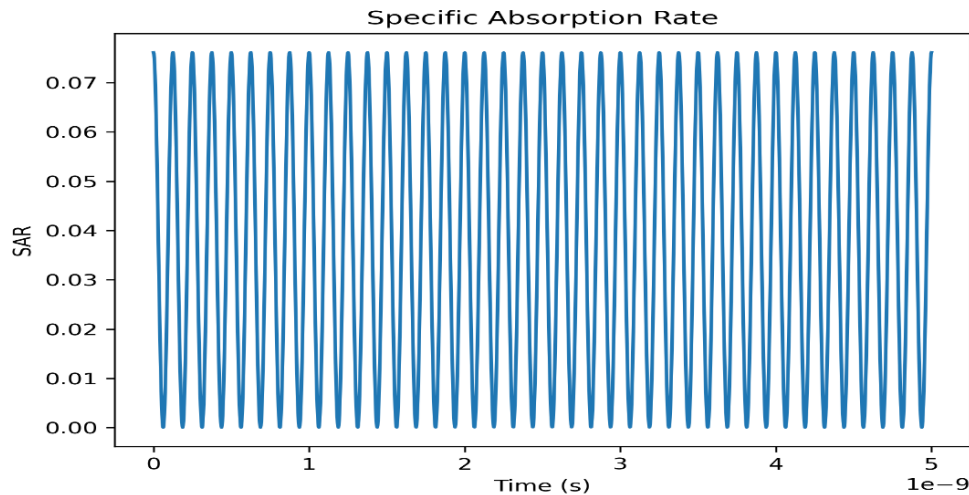


Fig. 3. Variation of the specific absorption rate (SAR) in biological tissue

As shown in Fig. 3, the SAR parameter varies periodically over time, which is associated with the harmonic structure of the microwave signal. The maximum SAR values correspond to the moments of the highest electric field strength. The obtained results show that at the low radiation intensity of the AIMT-1 device, the level of energy absorption by biological tissues remains relatively low.

To evaluate the possible thermal effect of microwave radiation on biological tissues, modeling of tissue temperature variation over time was performed. The calculations were based on the previously obtained SAR values for a microwave signal with a frequency of 4 GHz, corresponding to the operating range of the AIMT-1 device.

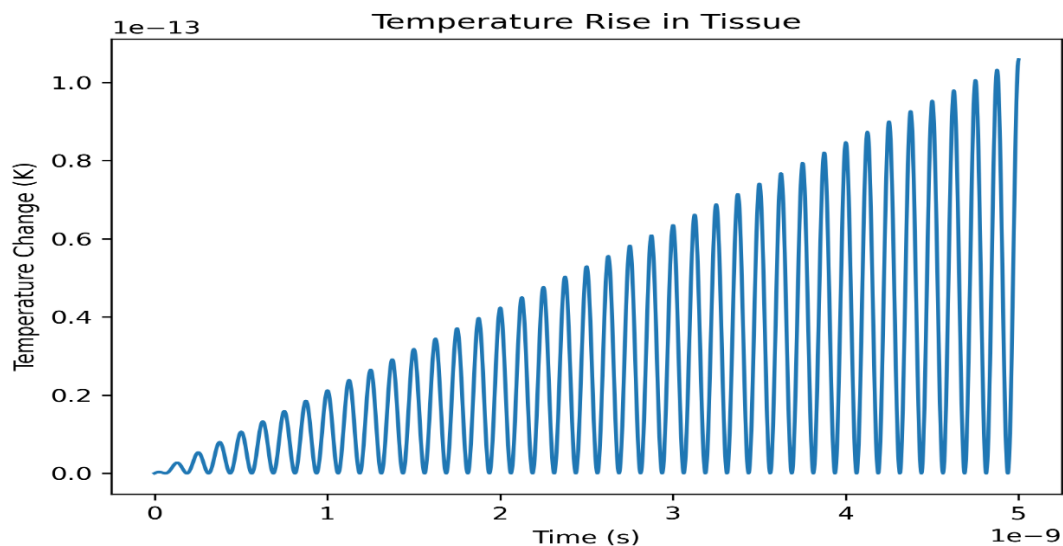


Fig. 4. Temperature variation of biological tissue under microwave signal exposure

As shown in Fig. 4, the change in tissue temperature is insignificant. This is due to the low power density of the microwave radiation generated by the AIMT-1 device. The obtained results demonstrate that under the considered radiation parameters, the thermal effect is minimal, which confirms the possibility of using low-intensity microwave exposure for therapeutic purposes.

To analyze the characteristics of different types of воздействия on biological tissues, a comparative modeling of microwave and acoustic signals was performed. Such a comparison makes

it possible to evaluate differences in the amplitude variation of the signals and their potential influence on biological systems.

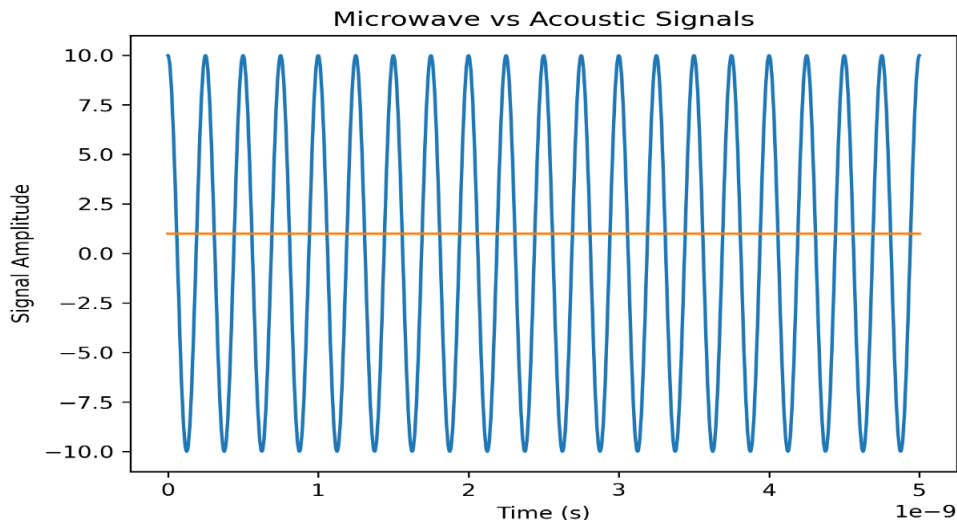


Fig. 5. Comparison of microwave and acoustic signals

As shown in Fig. 5, the microwave signal is characterized by high-frequency harmonic oscillations corresponding to the microwave frequency band. At the same time, the acoustic signal has a significantly lower frequency and smaller amplitude variations. Such differences in frequency characteristics determine the specific features of their interaction with biological tissues.

To evaluate the characteristics of microwave energy absorption by different biological tissues, modeling of the SAR distribution was performed. The calculations took into account the electrophysical parameters of the tissues, such as electrical conductivity and density.

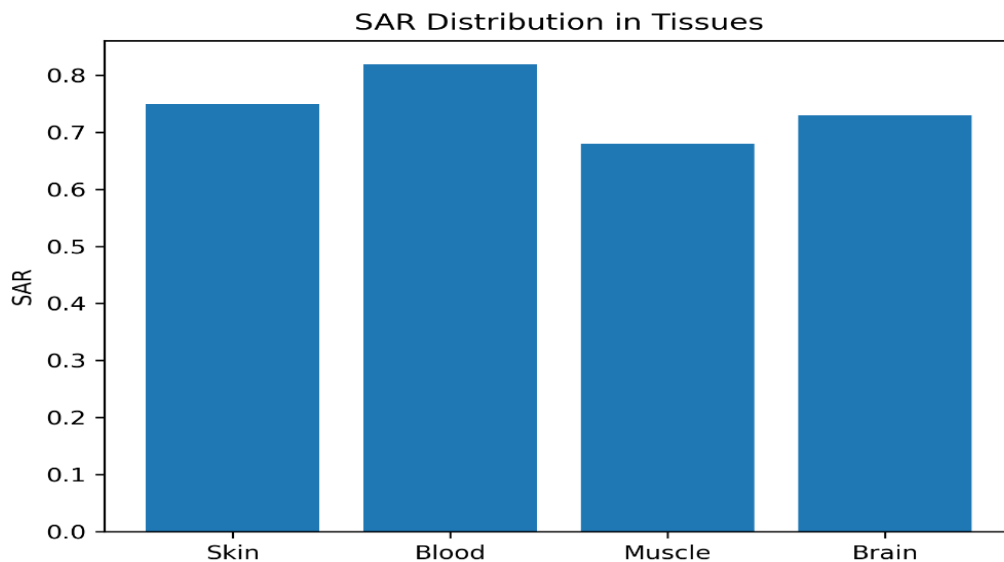


Fig. 6. Distribution of the specific absorption rate (SAR) in different biological tissues

As shown in Fig. 6, the SAR values differ for various types of biological tissues. The highest value is observed for **blood**, which is associated with its higher electrical conductivity. For **muscle tissue**, the SAR value is slightly lower, whereas for **skin and brain tissues**, the values lie within a similar range. The obtained results demonstrate the dependence of electromagnetic energy absorption on the electrophysical properties of biological tissues.

Discussion of Results

The results of numerical modeling show that microwave and acoustic signals have different mechanisms of interaction with biological tissues. Microwave radiation leads to the absorption of electromagnetic energy in tissues, which is characterized by the specific absorption rate (SAR) and may be accompanied by local changes in the biophysical parameters of cellular structures.

In contrast, acoustic signals mainly exert a mechanical effect on biological tissues, causing pressure oscillations and mechanical deformations of the medium.

A comparative analysis of the modeling results shows that microwave signals are characterized by a higher concentration of energy in the superficial layers of tissues, whereas acoustic signals are capable of propagating to greater depths. The obtained results confirm the difference in the physical mechanisms of interaction between microwave and acoustic signals and biological tissues.

Conclusion

In this work, mathematical modeling of the effects of low-intensity microwave radiation on human biological tissues was performed. The characteristics of the microwave signal generated by the solar microwave radiation modeling device AIMT-1, operating in the frequency range 4.0–4.3 GHz, were analyzed.

Based on the developed model, an analysis of electromagnetic energy absorption by biological tissues was carried out using the SAR parameter, and the temperature variation of tissues under exposure to low-intensity microwave radiation was also evaluated.

The obtained results show that under the considered radiation parameters, the thermal effect is insignificant, which indicates the possibility of using low-intensity microwave radiation for therapeutic purposes.

References

1. Shonazarov P. M., Bagaev V. N., Vdovina N. V., Gudaev N. N., Darovskikh S. N., Popenchitelev E. P., Shishkova Yu. S. Device for reducing the resistance properties of microorganisms. Russian Federation Patent RU 2733579 C1, filed February 11, 2020, published October 5, 2020. Author information updated January 10, 2023. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU2733579C1>
2. Даровских С.Н., Вдовина Н.В., Гудаев Н.Н. Устройство моделирования микроволнового излучения Солнца СВЧ-диапазона для оценки его модифицирующего действия на организмы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2015. — Т. 15, № 3. — С. 45–52.
3. Даровских С.Н., Вдовина Н.В., Гудаев Н.Н. Моделирование микроволнового излучения Солнца и его влияние на биологические объекты // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. — 2017. — № 4. — С. 23–29.
4. Даровских С.Н., Шоназаров П.М. Nature-like technology for treatment of human diseases based on simulated microwave radiation of the Sun // Proceedings of the International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT). — 2020. — P. 312–316.
5. Darovskikh S.N. Device for simulating solar microwave radiation // Patent RU 2573756. — Published 2016.
6. Markov M.S. Electromagnetic Fields in Biology and Medicine. — Boca Raton: CRC Press, 2015. — 504 p.
7. Foster K.R., Moulder J.E. Wi-Fi and health: review of current status of research // Health Physics. — 2017. — Vol. 113, No. 6. — P. 561–575.
8. Gabriel S., Lau R.W., Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: parametric models for the dielectric spectrum of tissues // Physics in Medicine and Biology. — 2019. — Vol. 64. — P. 1–15.
9. Szabo T.L. Diagnostic Ultrasound Imaging: Inside Out. — Academic Press, 2018. — 576 p.
10. Barnes F.S., Greenebaum B. Bioengineering and Biophysical Aspects of Electromagnetic Fields. — CRC Press, 2018.
11. Lin J.C. Electromagnetic fields in biological systems and their effects // IEEE Microwave Magazine. — 2022. — Vol. 23. — P. 32–41.

УДК 537.86:57.043; ГРНТИ 59.29.35

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОГЛОЩЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (2, 4, 6 И 40 ГГц) В БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЯХ ПРИ ФИКСИРОВАННОЙ ПАДАЮЩЕЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

П.М. Шоназаров*, С.Н. Даровских, Д.В. Топольский
Южно-Уральский государственный университет (НИУ),
Россия, Челябинск, *shonazarov1991@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования взаимодействия микроволновой электромагнитной радиации с биологическими тканями в частотном диапазоне 2–40 ГГц. Рассматривается влияние продолжительного гармонического сигнала без амплитудной или частотной модуляции. Исследование проводилось для частот 2, 4, 6 и 40 ГГц с фиксированной плотностью 100 микроватт на квадратный сантиметр. Математическая модель основана на уравнениях электродинамики для удельного коэффициента поглощения электромагнитной энергии (specific absorption rate – SAR), характеризующего уровень преобразования электромагнитной энергии в тепловую в биологических тканях. В процессе моделирования задавались напряженность электрического поля, удельный коэффициент поглощения электромагнитной волны и глубина проникновения микроволнового излучения. Программирование осуществлялось на языке Python. В результате моделирования были определены зависимости от частоты коэффициента поглощения электромагнитной волны и глубины проникновения микроволнового излучения. Показано, что с ростом частоты большая часть электромагнитной энергии поглощается в поверхностном слое биологической ткани и уменьшается глубина ее проникновения в ткань.

Ключевые слова: биологические ткани, удельный коэффициент поглощения электромагнитной волны, численное моделирование, глубина проникновения электромагнитной волны, микроволновая радиация, микроволновая терапия, электромагнитное взаимодействие.

MODELING AND COMPARATIVE ASSESSMENT OF CONTINUOUS-WAVE MICROWAVE ABSORPTION (2, 4, 6 AND 40 GHz) IN BIOLOGICAL TISSUES UNDER FIXED INCIDENT INTENSITY

P.M. Shonazarov*, S.N. Darovskikh, D.V. Topolskii
South Ural State University (National Research University),
Russia, Chelyabinsk, *shonazarov1991@gmail.com

Abstract. In this paper, numerical modeling of the interaction between microwave electromagnetic radiation and biological tissues in the frequency range of 2–40 GHz is performed. The influence of a continuous harmonic signal (continuous wave, CW) without amplitude or frequency modulation is considered. The study is carried out for frequencies 2, 4, 6, and 40 GHz at a fixed incident power density of 100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. The mathematical model is based on the equations of electrodynamics and the expression for the specific absorption rate (SAR), which characterizes the level of conversion of electromagnetic energy into thermal energy in biological tissues. During the modeling process, the electric field strength, the attenuation coefficient of the electromagnetic wave, and the penetration depth of microwave radiation were determined. Numerical calculations were performed using the Python programming language. As a result of the modeling, the dependences of SAR, the attenuation coefficient, and the penetration depth of electromagnetic radiation on frequency were obtained. It is shown that an increase in frequency leads to higher energy absorption in the surface layers of biological tissues and a decrease in the penetration depth of electromagnetic waves.

Keywords: biological tissues, specific absorption rate (SAR), numerical modeling, penetration depth of electromagnetic waves, microwave radiation, microwave therapy, electromagnetic interaction.

Introduction

The study of the interaction between microwave electromagnetic radiation and biological tissues is an important task of modern biophysics and medical electronics [3,4,9]. The development

of radio-frequency technologies requires a detailed analysis of the mechanisms of electromagnetic energy absorption in biological structures.

One of the key parameters characterizing the degree of electromagnetic field exposure to biological tissues is the specific absorption rate (SAR), defined as the power absorbed per unit mass of tissue [5,6].

In recent years, particular interest has been focused on the use of low-intensity microwave radiation in medical technologies [1,2]. One of such devices is the hardware–software complex for modeling microwave radiation of the Sun AIMT-1, operating in the frequency range 4.0–4.3 GHz.

However, an important scientific problem remains the comparative evaluation of microwave radiation absorption at different frequencies in biological tissues [6–8,10–13].

The aim of this work is numerical modeling and comparative analysis of the absorption of continuous microwave radiation in biological tissues at frequencies of 2, 4, 6, and 40 GHz.

Interaction of microwave radiation with biological tissues

The propagation of an electromagnetic wave in a homogeneous medium can be described by a harmonic function

$$E(t) = E_0 \cos(2\pi ft), \quad (1)$$

where E_0 - amplitude of the electric field;

f - frequency of the electromagnetic wave.

The wavelength of electromagnetic radiation is determined by the expression

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2)$$

where λ - wavelength of electromagnetic radiation, m;

c - speed of light in vacuum;

f - frequency of electromagnetic radiation.

The wave number is defined as

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (3)$$

where k – wave number characterizing the spatial variation of the phase of the electromagnetic wave.

Taking into account expression (2), the wave number can be written as

$$k = \frac{2\pi f}{c}, \quad (4)$$

where f - frequency of electromagnetic radiation;

c - speed of light in vacuum.

The dielectric properties of biological tissues are described by the complex permittivity

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'', \quad (5)$$

where ε' - dielectric permittivity of the medium;

$j\varepsilon''$ - dielectric losses.

The dielectric properties of biological tissues and their frequency dependence are discussed in detail in several studies [7,8,13].

The power flux density of electromagnetic radiation is determined by the expression

$$S = \frac{E^2}{\eta}, \quad (6)$$

where S - power flux density;

η - wave impedance of the medium.

The main characteristic describing energy absorption is the specific absorption rate

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho}, \quad (7)$$

where σ - electrical conductivity of tissue;

ρ - tissue density.

The attenuation of an electromagnetic wave in a biological medium is characterized by the attenuation coefficient

$$\alpha = \sqrt{\pi f \mu \sigma}, \quad (8)$$

where α - attenuation coefficient;

f - frequency;

μ - magnetic permeability of the medium;

σ - electrical conductivity of tissue.

The penetration depth of electromagnetic radiation is determined as

$$\delta = \frac{1}{\alpha}, \quad (9)$$

where δ - penetration depth;

α - attenuation coefficient.

This value characterizes the distance at which the amplitude of the electromagnetic wave decreases by a factor of e [6].

Biological Tissue Model

To analyze the interaction of microwave radiation with biological tissues, a multilayer model was used, including the following tissue types:

- skin;
- adipose tissue;
- blood.

Such models are widely used in studies of electromagnetic interaction with biological objects [7,8,13].

The modeling was performed for the following frequencies:

- 2 GHz;
- 4 GHz;
- 6 GHz;
- 40 GHz.

The incident power flux density was assumed to be

$$S = 100 \mu W / cm^2$$

which corresponds to low-intensity microwave exposure.

Numerical Modeling

Numerical modeling of the interaction between microwave electromagnetic radiation and biological tissues was performed using the Python programming language and scientific computing libraries.

The initial modeling parameters included continuous microwave radiation in the frequency range 2, 4, 6, and 40 GHz. The incident power flux density was assumed to be

$$S = 100\mu W/cm^2,$$

which corresponds to low-intensity microwave exposure typical for biophysical studies.

During the modeling process, the following parameters were determined:

- electric field strength;
- specific absorption rate (SAR);
- attenuation coefficient of the electromagnetic wave;
- penetration depth of electromagnetic radiation into biological tissues.

The calculations were performed based on the presented mathematical model of electromagnetic wave interaction with biological media.

Modeling Results

The results of the numerical modeling are presented in Figures 1–3. The obtained dependencies make it possible to evaluate the influence of microwave radiation frequency on the main parameters of electromagnetic field interaction with biological tissues.

To evaluate the characteristics of microwave radiation absorption in biological tissues, numerical modeling of the dependence of the specific absorption rate (SAR) on the frequency of electromagnetic radiation was performed. The calculations were carried out for frequencies 2, 4, 6, and 40 GHz at a fixed incident power flux density of $100\mu W/cm^2$.

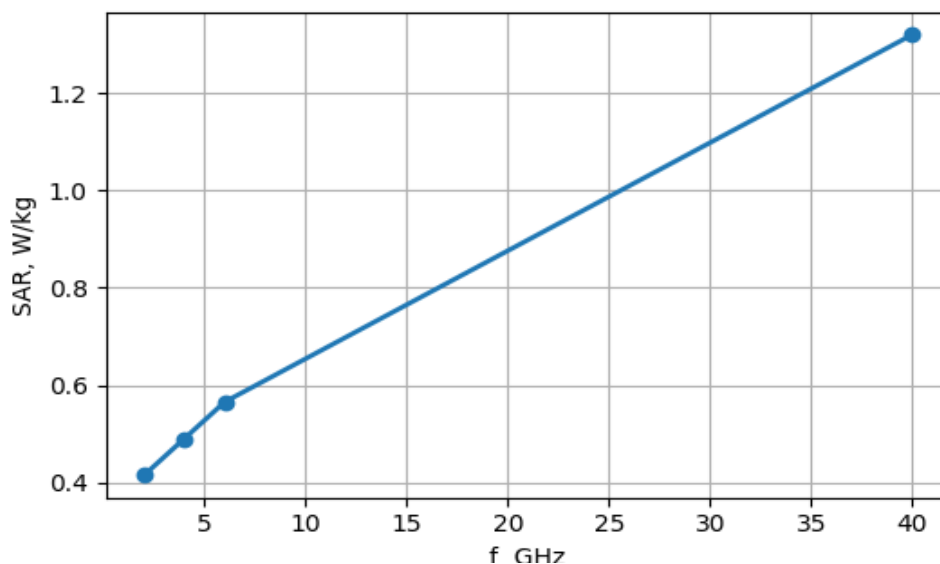


Figure 1. Dependence of the specific absorption rate (SAR) on the frequency of microwave radiation

As can be seen from Figure 1, an increase in the microwave radiation frequency leads to an increase in the specific absorption rate in biological tissues. The minimum SAR values are observed at a frequency of 2 GHz, whereas when the frequency increases to 40 GHz, the SAR value increases significantly.

The obtained results are explained by the fact that with an increase in the frequency of the electromagnetic field, the electrical conductivity of biological tissues increases, which leads to an intensification of the processes of electromagnetic energy absorption.

Thus, an increase in the frequency of microwave radiation is accompanied by an increase in the intensity of energy absorption in biological tissues. This is associated with an increase in dielectric losses and electrical conductivity of biological tissues with increasing frequency of the electromagnetic field.

The obtained results are consistent with the known patterns of interaction between microwave radiation and biological media, which is also noted in a number of studies [10–12,14,15].

To analyze the propagation of microwave radiation in biological tissues, the dependence of the attenuation coefficient of the electromagnetic wave on the radiation frequency was determined. The calculations were performed for frequencies 2, 4, 6, and 40 GHz under the same model parameters.

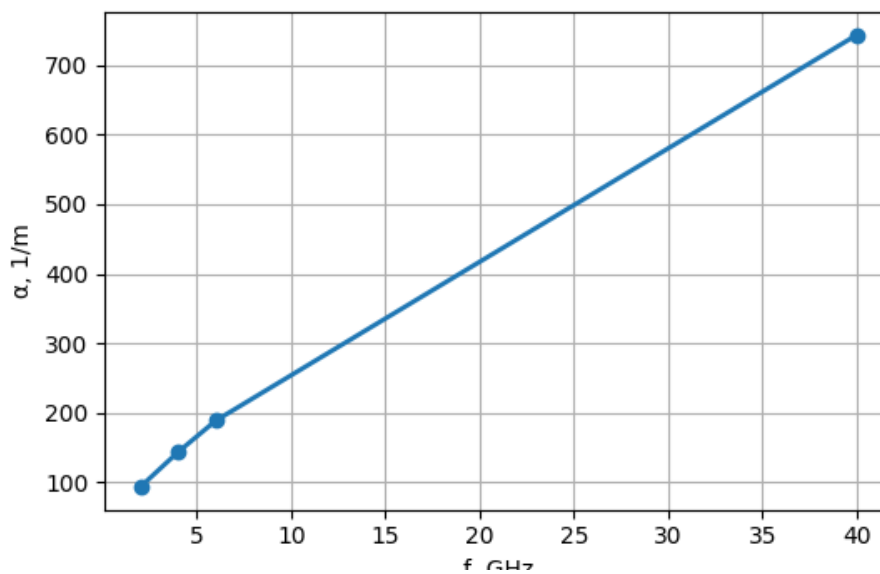


Figure 2. Dependence of the attenuation coefficient of the electromagnetic wave on the frequency of microwave radiation

As can be seen from Figure 2, the attenuation coefficient of the electromagnetic wave increases with increasing microwave radiation frequency. The minimum values of the attenuation coefficient are observed at a frequency of 2 GHz, whereas when the frequency increases to 40 GHz, a significant increase in this parameter occurs.

The increase in the attenuation coefficient is associated with the intensification of electromagnetic energy absorption processes in biological tissues with increasing radiation frequency. As a result, the electromagnetic wave attenuates more rapidly during propagation in the biological medium. This effect has a significant influence on the distribution of electromagnetic energy in tissues.

Thus, an increase in the microwave radiation frequency leads to more intensive attenuation of the electromagnetic wave in tissues, which affects the penetration depth of the electromagnetic field.

To evaluate the propagation characteristics of microwave radiation in biological tissues, the dependence of the penetration depth of the electromagnetic wave on the radiation frequency was determined. The calculations were carried out for frequencies 2, 4, 6, and 40 GHz at a fixed incident power flux density.

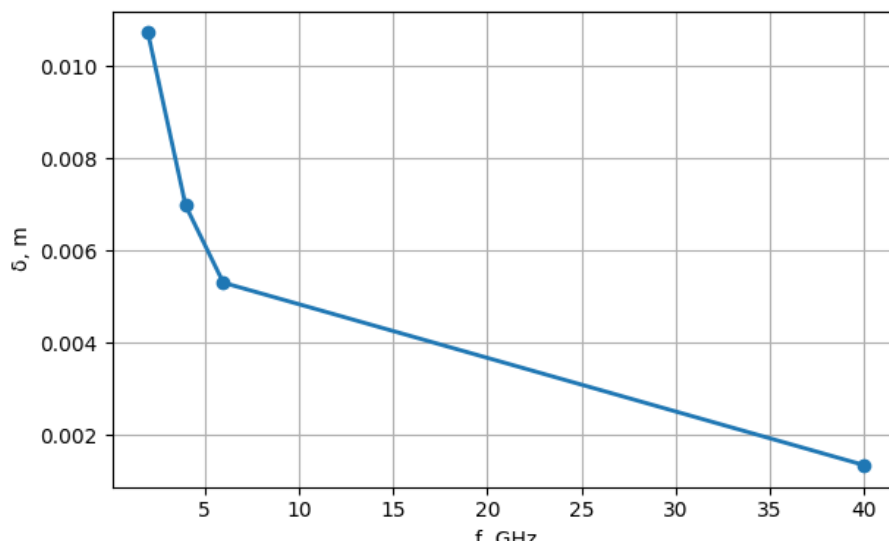


Figure 3. Dependence of the penetration depth of microwave radiation in biological tissues on frequency

As can be seen from Figure 3, the penetration depth of microwave radiation decreases with increasing frequency of the electromagnetic field. The greatest penetration depth is observed at a frequency of 2 GHz, whereas when the frequency increases to 40 GHz, this parameter decreases significantly.

This is due to the fact that with increasing frequency the attenuation coefficient of the electromagnetic wave in biological tissues increases. As a result, electromagnetic radiation attenuates more rapidly during propagation in the biological medium.

Thus, lower frequencies of the microwave range provide deeper penetration of the electromagnetic field into biological tissues, whereas high-frequency radiation is characterized predominantly by surface interaction. This must be taken into account when selecting the operating parameters of microwave therapy devices.

The performed numerical modeling showed that the parameters of interaction between microwave electromagnetic radiation and biological tissues significantly depend on the radiation frequency. It was established that with increasing frequency the specific absorption rate (SAR) and the attenuation coefficient of the electromagnetic wave increase, while the penetration depth of radiation decreases.

The obtained results show that at relatively low frequencies (2–4 GHz) electromagnetic radiation is capable of penetrating deeper layers of biological tissues. When the frequency increases to 40 GHz, predominantly surface absorption of energy is observed.

Of particular interest is the frequency range of about 4 GHz, corresponding to the operating range of the AIMT-1 device for modeling microwave radiation of the Sun, for which a more balanced ratio between penetration depth and energy absorption level in biological tissues is observed. Thus, the performed numerical modeling makes it possible to evaluate the features of propagation and absorption of microwave radiation in biological tissues over a wide frequency range.

Conclusion

In this paper, numerical modeling of the interaction between microwave electromagnetic radiation and biological tissues in the frequency range 2–40 GHz was performed. The modeling was carried out for a continuous microwave signal at a fixed incident power flux density of $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Based on the developed mathematical model, the dependences of the specific absorption rate (SAR), the attenuation coefficient of the electromagnetic wave, and the penetration depth of radiation on the microwave field frequency were obtained. The modeling results showed that an increase

in radiation frequency leads to an increase in the level of electromagnetic energy absorption in biological tissues and a simultaneous decrease in the penetration depth of electromagnetic waves.

It was established that at relatively low microwave frequencies (2–4 GHz) electromagnetic radiation is capable of penetrating deeper layers of biological tissues. When the frequency increases to 40 GHz, predominantly surface absorption of energy in biological media is observed.

The obtained results confirm that the frequency range around 4 GHz, corresponding to the operating range of the AIMT-1 device for modeling microwave radiation of the Sun, provides a more balanced ratio between the penetration depth of microwave radiation and the level of energy absorption in biological tissues.

The results of this work can be used in further studies of the interaction of microwave electromagnetic radiation with biological objects, as well as in the development of hardware–software systems for modeling and applying microwave radiation in biophysical and medical research. The obtained results are consistent with modern studies of the biological effects of microwave radiation [10–15]. The obtained results can also be used in further studies of the mechanisms of interaction between electromagnetic radiation and biological objects and in the optimization of parameters of microwave medical technologies.

References

1. Shonazarov P. M., Bagaev V. N., Vdovina N. V., Gudaev N. N., Darovskikh S. N., Popchitelev E. P., Shishkova Yu. S. Device for reducing the resistance properties of microorganisms. Russian Federation Patent RU 2733579 C1, filed February 11, 2020, published October 5, 2020. Author information updated January 10, 2023. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU2733579C1>
2. Даровских С.Н., Вдовина Н.В., Гудаев Н.Н. Устройство моделирования микроволнового излучения Солнца СВЧ-диапазона для оценки его модифицирующего действия на организмы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2015. — Т. 15, № 3. — С. 45–52.
3. Prokopov I., Shonazarov P. M., Darovskikh S. N., Gudaev N. N. Hardware and software tools for modeling solar microwave radiation and natural magnetospheric disturbances // III All-Russian Scientific Conference with International Participation “*Science, Technology, Society: Environmental Engineering for Sustainable Development of Territories*”. — 2022. — DOI: 10.47813/nto.3.2022.6.242-249.
4. Даровских С.Н., Багаев В.Н., Вдовина Н.В. Аппаратно-программные средства моделирования микроволнового излучения Солнца для исследования биологических эффектов низкоинтенсивного электромагнитного излучения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2017. — Т. 17. — № 3. — С. 74–82.
5. ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz) // *Health Physics*. — 2020. — Vol. 118. — No. 5. — P. 483–524.
6. Foster K. R., Glaser R. Thermal mechanisms of interaction of radiofrequency energy with biological systems // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. — 2007. — Vol. 48. — No. 11. — P. 1049–1063.
7. Gabriel S., Lau R. W., Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey // *Physics in Medicine and Biology*. — 1996. — Vol. 41. — P. 2231–2249.
8. Gandhi O. P., Lazzi G., Furse C. M. Electromagnetic absorption in the human head and neck for mobile telephones at 835 and 1900 MHz // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. — 1996. — Vol. 44. — No. 10. — P. 1884–1897.
9. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Electrodynamics of Continuous Media*. — Oxford: Pergamon Press, 1984.
10. Zhadobov M., Chahat N., Sauleau R., Le Quement C., Le Drean Y. Millimeter-wave interactions with the human body: state of knowledge and recent advances // *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. — 2011. — Vol. 3. — No. 2. — P. 237–247.
11. Simko M., Mattsson M. O. 5G wireless communication and health effects — a pragmatic review based on available studies regarding 6 to 100 GHz // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. — 2019. — Vol. 16. — No. 18. — 3406.
12. Kostoff R. N., Heroux P., Aschner M., Tsatsakis A. Adverse health effects of 5G mobile networking technology under real-life conditions // *Toxicology Letters*. — 2020. — Vol. 323. — P. 35–40.
13. Pakhomov A. G., Akyel Y., Pakhomova O. N., Stuck B. E., Murphy M. R. Current state and implications of research on biological effects of millimeter waves // *Bioelectromagnetics*. — 1998. — Vol. 19. — No. 7. — P. 393–413.

14. ITU-R. Effects of electromagnetic fields on biological systems // International Telecommunication Union Report. — Geneva, 2021.

15. WHO. Electromagnetic fields and public health: radiofrequency fields. — World Health Organization Report. — Geneva, 2020.

УДК 621.316.825.4:004.94; ГРНТИ 47.33

РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЗИРОВАННОЙ SPICE-МОДЕЛИ PTC-ТЕРМИСТОРА ДЛЯ СРЕДЫ MULTISIM

О.Г. Урюпин, М.Б. Каплан

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, kaplan.m.b@iibmt.rsreu.ru*

Аннотация. В работе представлена методика создания параметризированной SPICE-модели PTC-термистора в среде Multisim. Модель построена на базе стандартной NTC-модели Vishay и адаптирована для керамического материала SrTiO₃. Описана электротепловая аналогия, позволяющая учитывать саморазогрев термистора протекающим током. Все параметры материалов вынесены в отдельные блоки, что обеспечивает универсальность модели. Приведены результаты моделирования, подтверждающие корректность разработанных моделей. Полученная SPICE-модели могут быть использованы при проектировании схем температурной компенсации, защиты от перегрузки и датчиков температуры.

Ключевые слова: PTC-термистор, позистор, SrTiO₃, SPICE-модель, Multisim, температура Кюри, электротепловая аналогия.

DEVELOPMENT OF A PARAMETERIZED SPICE MODEL OF A PTC THERMISTOR FOR THE MULTISIM

O.G. Uryupin, M.B. Kaplan

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, kaplan.m.b@iibmt.rsreu.ru*

The summary. This paper presents a method for creating a parameterized SPICE model of a PTC thermistor (positistor) in the Multisim environment. The model is based on the standard Vishay NTC model and has been adapted for the ceramic material SrTiO₃. The paper describes an electrothermal analogy that allows for the self-heating of the thermistor by the current flowing through it. All material parameters are separated into individual blocks, ensuring the model's versatility. The paper presents the results simulations, which confirm the correctness of the developed models. The obtained SPICE models can be used in the design of temperature compensation circuits, overload protection, and temperature sensors.

Keywords: PTC thermistor, positistor, SrTiO₃, SPICE model, Multisim, Curie temperature, electrothermal analogy.

Терморезистивные датчики температуры широко применяются в промышленной и бытовой электронике благодаря высокой чувствительности, стабильности показаний, большому сроку службы. Терморезисторы делят на две группы, различающиеся зависимостью сопротивления от температуры, так термисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) называются NTC-термисторы, а термисторы обладающие положительным ТКС образуют группу PTC-термисторы (рис. 1). В рамках работы особое внимание уделено PTC-термисторам. Чаще всего для изготовления для PTC-термисторов используются материал на основе титаната бария BaTiO₃, а также применяется титанат SrTiO₃ [1][2].

Несмотря на наличие готовых моделей NTC-термисторов в библиотеках САПР, модели PTC-компонентов часто либо отсутствуют, либо являются закрытыми. Это затрудняет сквозное проектирование устройств защиты и температурного контроля.

Цель настоящей работы – создание параметризированной SPICE-модели PTC-термистора, позволяющей варьировать тип материала простым изменением набора числовых

коэффициентов. В качестве прототипа используется распространённая NTC-модель Vishay [3], которая модифицируется для воспроизведения PTC-эффекта. В качестве среды схемотехнического моделирования выбрана программа Multisim.

В общем случае терморезисторы обладают нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ), однако при работе с помощью электронных схем задается рабочая точка на участке ВАХ, в рамках которого зависимость близка к линейной. Кроме того положение линейного участка связано с конструкцией, размером, а также с выбранным диапазоном температур. Как правило высокой линейностью обладает начальный участок шкалы, именно его выбирают для решения задач контроля температуры, а также в цепях термокомпенсации электрических цепей. Применение терморезисторов с отрицательным ТКС часто встречается в схемах содержащих реле, которые в свою очередь используются в измерителях мощности электромагнитного СВЧ излучения, приборах измерения напряжения, блоках стабилизации температуры. В случае построения систем пожарной сигнализации и каналов теплового контроля также выбирается нисходящий участок ВАХ, позволяющий эффективно отслеживать процесс изменения температуры внешней среды, за счет контроля изменения величины тока при фиксированном значении напряжения. Применение резисторов не ограничено контролем воздушной среды, они также позволяют выполнить измерение температуры в жидких и сыпучих средах.

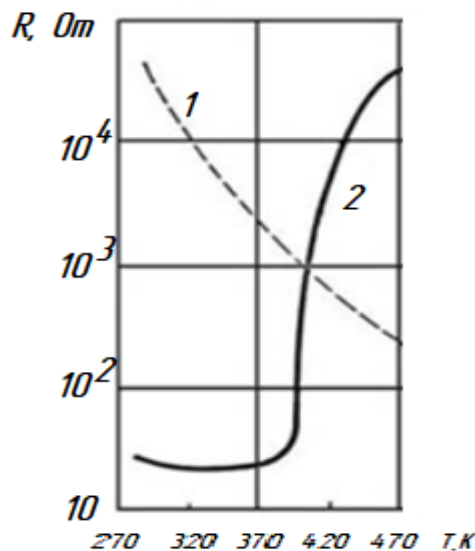


Рис. 1. Зависимость сопротивления терморезистора от температуры: 1 - ТКС < 0; 2 - ТКС > 0

Следует обратить внимание на наличие терморезисторов с особой конструкцией, включающей косвенный подогрев. В подобных структурах присутствует специальная обмотка, изолированная от полупроводникового резистивного элемента [4]. В этом случае тепловой режим работы датчика зависит от температуры подогревателя, которая в свою очередь управляется, протекающим через обмотку током. Указанные термодатчики являются управляемыми с возможностью задания нужного значения исходного сопротивления. Из терморезисторов с положительным температурным коэффициентом наиболее часто используются терморезисторы, изготовленные из твердых растворов на основе ВаТiО, которые называются позисторами. Высокой линейностью ВАХ обладают терморезисторы с положительной ТКС на основе кремния, однако значение коэффициента не велико и составляет 0,5-0,7%/К. Подобные датчики находят применение в цепях термостабилизации транзисторных схем.

Для описания сопротивления PTC-термистора в окрестности температуры Кюри как правило используют экспоненциальную функцию с полиномиальным показателем:

$$R(T) = R_0 \exp\left(A(T - T_0) + B(T - T_{curic})^2 + C(T - T_{curic})^3\right) \quad (1)$$

где R_0 – сопротивление при опорной температурной $T_0 = 25^\circ\text{C}$; T_{curic} – температура Кюри; A, B, C – эмпирические коэффициенты, определяющие крутизну и форму РТС-перехода

Для терморезистора из материала SrTiO_3 характерен плавный рост сопротивления, что соответствует относительно низким значениям эмпирических коэффициентов

Для моделирования температурной зависимости датчика в среде Multisim использовалась электротепловая аналогия [5], согласно которой выполнена следующая замена физических величин:

- температура датчика – напряжение;
- тепловая мощность – ток;
- теплоемкость – емкость;
- теплопроводность – электрическая проводимость;
- температура окружающей – источник напряжения;
- источник тепла – источник тока.

Таким образом задача по измерению температуры заменяется задачей по измерению напряжения падения на терморезисторе.

В качестве базовой математической модели, описывающей связь температуры окружающей среды с температурой датчика, использовалось уравнение теплового баланса:

$$C_{th} \frac{dT}{dt} = P - G_{th} (T(t) - T_0)$$

где C_{th} – теплоёмкость; P – мгновенная, рассеиваемая на термисторе, электрическая мощность; G_{th} – тепловая проводимость; T_0 – температура окружающей среды.

В SPICE-модели реализация зависимости осуществляется за счет применения источника тока, управляемого мощностью, а также дополнительной RC-цепочкой.

За основу взята SPICE – модель NTC – термистора Vishay NTCLE101E3C90173 [6]. Коррекция содержимого модели была проведена следующим образом.

1. Функция сопротивления заменена с NTC – зависимости на РТС – зависимость вида (1).
2. Удалены параметры, специфичные для NTC (бета-коэффициент, степенные полиномы Стейнхарта – Харта).
3. Введён блок параметров материала, включающий R_0, T_{curic}, A, B, C и теплофизические константы (λ, c, ρ , пористость).
4. Сохранена тепловая подсистема, вычисляющая G_{th} и C_{th} через геометрию и свойства материала.

Модель оформлена как подсистема [7] с тремя контактами, два из которых используются в качестве выводов резистора и один контакт (Tin) – вход задания температуры, где $1\text{V} \equiv 1^\circ\text{C}$. Для исследования в среде Multisim собрана электрическая схема (рис. 2). По результату моделирования, что также соответствует [8], получена экспериментальная зависимость, которая представляет собой функцию сопротивления от температуры, используемую, в том числе, термисторам аналогам с положительной ТКС (рис. 3).

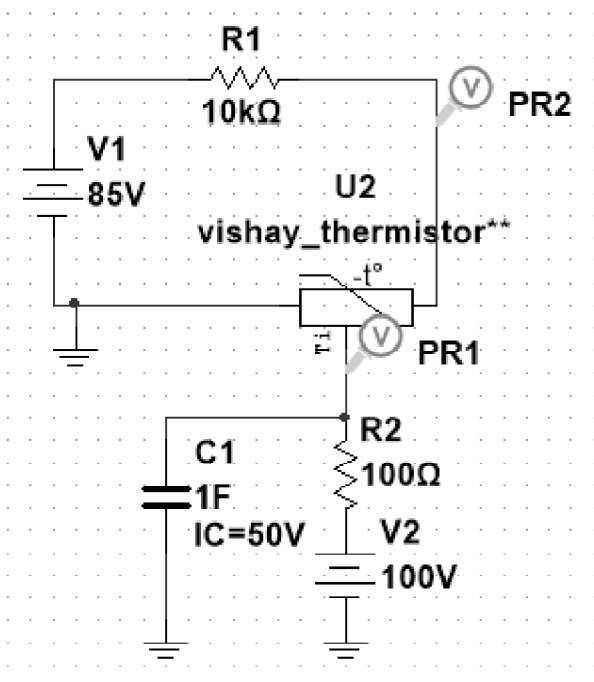


Рис. 2. Схема исследования РТС-термистора

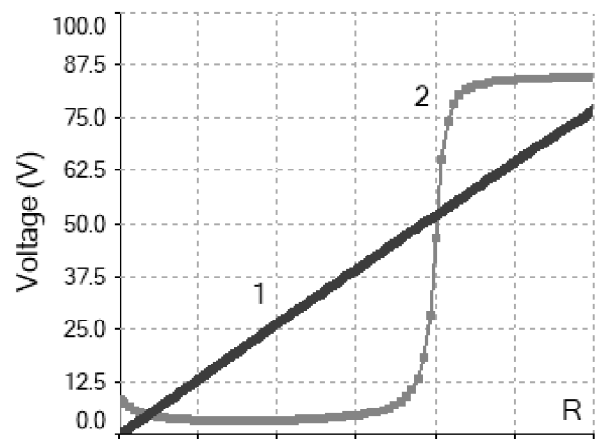


Рис. 3. Экспериментальная зависимость РТС-термистора: 1 – эквивалентная температуры; 2 – сопротивление

В ходе работы разработана параметризованная SPICE – модель РТС – термистора, адаптированная для среды Multisim. Параметры SPICE-модели были выбраны априорным путем и представлены в таблице. Результат моделирования подтвержден экспериментальной зависимостью.

Таблица. Параметры SPICE-модели

Обозначение параметра	Значение	Описание
Параметры материала		
.PARAM Dopant_Level	0.002	Уровень легирования (2% атомных)
.PARAM Grain_Size	3.0	Размер зерна (микрон)
Критические температурные параметры		
.PARAM T_curie	80	Температура Кюри для SrTiO ₃ (°C)
.PARAM T0	25	Опорная температура (°C)
.PARAM R0	100	Сопротивление при T0 (Ом)
Температурные коэффициенты		
.PARAM Material_A	0.028	Линейный коэффициент
.PARAM Material_B	0.00065	Квадратичный коэффициент
.PARAM Material_C	0.00004	Кубический коэффициент
Физические свойства		
.PARAM Thermal_Conductivity	3.2	Теплопроводность (W/m·K)
.PARAM Specific_Heat	780	Удельная теплоемкость (J/kg·K)

Таким образом, разработанная модель базируется на электротепловой аналогии и позволяет:

- задавать тип материала простым изменением блока параметров;
- использовать готовую SPICE-модель в учебном процессе и инженерной практике.

Предложенный подход может быть использован при исследовании других РТС – материалов, например, легированный свинцом титана, а также для создания библиотек компонентов датчиков температуры.

Библиографический список

1. Magerl A. PTC Thermistors: Materials, Technology and Applications // Ceramic Materials for Electronics. – 3rd ed. – New York: CRC Press, 2018. – P. 156–182.
2. Huybrechts B., Ishizaki K., Takata M. The positive temperature coefficient of resistivity in barium titanate ceramics // Journal of Materials Science. – 1999. – Vol. 34, No. 10. – P. 2201–2212.
3. Vishay. NTCLE101E3C90173 – NTC Thermistor, SPICE Model [Electronic resource]. – Vishay Intertechnology, 2016. – URL: <https://www.vishay.com>
4. Баринов А.Д., Литвинов В.Г., Мирошникова И.Н., Попов А.И. Эффективность методов управления свойствами полупроводников с различной степенью урорядочения атомной структуры // Вестник РГРТУ, № 94, 2025. – С. 166-176.
5. Sabry M. Electrothermal Analogies in Electronic Circuit Simulation // International Journal of Circuit Theory and Applications. – 2020. – Vol. 48, No. 3. – P. 412–425.
6. Vishay. PTCSL03 Series: PTC Thermistors for Overcurrent Protection [Electronic resource]. – Datasheet, 2016. – URL: <https://www.vishay.com/docs/29160/ptcsl03.pdf>
7. Бочаров В.А., Волосатова Т.М., Филиппов М.В. и др. Декомпозиция и агрегация функциональных моделей систем // Вестник РГРТУ, № 89, 2024. – С. 85-93.
8. Перепелкин Д.А., Ликучев В.Ю. Разработка алгоритмов структурирования электрической схемы в решении задач размещения радиоэлектронных компонентов на основе мультиагентных систем// Вестник РГРТУ, № 87, 2024. – С. 90-102.

УДК 616-073.756.8; ГРНТИ 76.13.15

АЛГОРИТМ ОСВОЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА БАЗЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

У.А. Джамал, М.Б. Каплан

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, kaplan.m.b@iibmt.rsreu.ru

Аннотация. В статье рассматривается алгоритм компьютерной обработки изображений, получаемых на лабораторной установке рентгеновской компьютерной томографии. Основное внимание уделено разработке и апробации подхода обработки томографических данных. Цель статьи заключалась в изучении принципов формирования 3D-изображений на компьютерном томографе и применении методов компьютерной обработки медицинских изображений в рамках процесса обучения. Представлена пошаговая инструкция обработки изображений с применением специализированного программного обеспечения VolView.

Ключевые слова: Компьютерной томографии, компьютерная обработка изображений.

ALGORITHM FOR MASTERING COMPUTER IMAGE PROCESSING BASED ON A LABORATORY INSTALLATION FOR COMPUTER TOMOGRAPHY

U.A. Jamal, M.B. Kaplan

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, kaplan.m.b@iibmt.rsreu.ru

The summary. This article examines an algorithm for computer processing of images obtained on a laboratory X-ray computed tomography system. The focus is on the development and validation of an approach to processing tomographic data. The purpose of the article was to study the principles

of 3D image formation on a computed tomography system and the application of computer processing methods for medical imaging in educational settings. Step-by-step instructions for image processing using specialized VolView software are presented.

Keywords: Computed tomography, computer image processing.

Компьютерная томография (КТ) представляет собой диагностический метод, основанный на послойном исследовании внутренних органов и тканей путем пропускания узкого рентгеновского луча вокруг тела пациента. Получаемые данные обрабатываются компьютером, формируя детализированные снимки слоев организма [1]. Основопологающий принцип КТ заключается в способности разных тканей поглощать рентгеновские лучи неодинаково сильно. Именно эта разница фиксируется аппаратурой и позволяет получать четкие изображения внутренних структур человеческого тела. Сегодня технология широко применяется в медицинской диагностике, научных исследованиях и промышленном контроле [2].

Для получения точных диагностических результатов на основе регистрируемых данных с помощью КТ особое внимание уделяется методам обработки цифровых изображений. Среди последних особенно важны алгоритмы оптимизации, сегментации, выделения контуров и особых признаков, а также методы предварительного сглаживания и морфологических преобразований. Выбранный подход к реализации и производительность программных блоков определяют эффективность интерпретации сложных изображений. Отдельно следует отметить важность построения алгоритмов фильтрации, устраняющих нежелательные артефакты и шумы на снимках. Это критически важно для последующей диагностики и лечения пациентов.

Качество получаемого изображения оценивают как объективно, так и субъективно. Однако наиболее предпочтительным является сочетание обоих подходов, позволяющее автоматизировать процесс контроля качества КТ-исследования и снизить вероятность ошибок [3, 4].

Настоящая работа посвящена разработке алгоритма освоения компьютерной обработки изображения в рамках образовательного процесса студентов и молодых специалистов изучающих КТ. В качестве исходного материала для проведения рентгеновской компьютерной микротомографии использовались шейная и бедренная кость курицы. Эксперименты были реализованы на лабораторном томографе RHYWE XR 4.0. Данный аппарат обеспечивает получение качественных двух-трехмерных изображений и удобен для проведения научно-исследовательских работ и образовательных мероприятий. Аппарат оснащён источником излучения с максимальной энергией 35 кВ и силой тока 1 мА, а также цифровой камерой с матричным разрешением 1024×1024 пикселя размером 49,3×49,2 мм и предельным пространственным разрешением 48 мкм.



Рис. 1. Лабораторный стенд на базе компьютерного рентгеновского томографа XR 4.0:
1 – рентгеновская трубка; 2 – экспериментальная камера; 3 – цифровая камера;
4 – поворотный столик с исследуемым образцом;
5 – компьютер с программным обеспечением реконструкции КТ изображений

Для исследования структуры образцов костной ткани использовались методы рентгеновской томографии и последующая компьютерная обработка изображений. Исходные томографические снимки были выполнены томографе, оснащенный программой «Measure CT», при съемке с разрешением 400 проекций и полным оборотом образца на 360 градусов. Это позволило создать детальные трехмерные реконструкции внутреннего строения материала. Полученные исходные данные (рис. 2, а, г) демонстрирует срезы первоначального КТ-изображения костной ткани. После предварительной обработки методами бинаризации и выделения областей пор образовались промежуточные слои (рис. 2, б, д), на которых черные области соответствуют пустотам внутри костной ткани. Завершающим этапом стало построение контура пор (рис. 2, в, е). Для повышения качества безусловно требуется увеличение разрешающей способности получаемых снимков, однако это приводит к увеличению исходного количества данных, что предъявляет дополнительные требования в производительности как аппаратной, так и программной части комплекса компьютерного томографа.

Обработка полученных снимков выполнялась с помощью специализированного программного обеспечения VolView [5]. Предложенный алгоритм обработки данных и формирования трехмерной модели, включает следующие этапы.

1. Загрузка данных, заключающаяся в послойной передаче томографических снимков.

2. Настройка отображения путем коррекции контрастности, яркости, цвета и прозрачности (scalar opacity mapping), что определило качество визуализации трёхмерного представления структуру кости. Основные действия связаны с нормализацией, когда изменялся диапазон градации величины яркости пикселя от 0 до 255 для изображений, представленных в оттенках серого [6]. В ряде случаев проводилось выравнивание, в ходе которого изменялись уровни яркости изображения таким образом, чтобы для каждого из уровней было получено одинаковое количество пикселей.

3. Сегментация ключевых срезов. Проводилась с помощью специальных программных инструментов Threshold и Freehand, применение которых позволило выделить границы объекта, а в дальнейшем построить общую маску, объединяющую анализируемые области. Основным приемом выступала пороговая бинаризация, когда фрагменты снимка разделялись на полтора тона, с целью получить монохромного изображение [7].

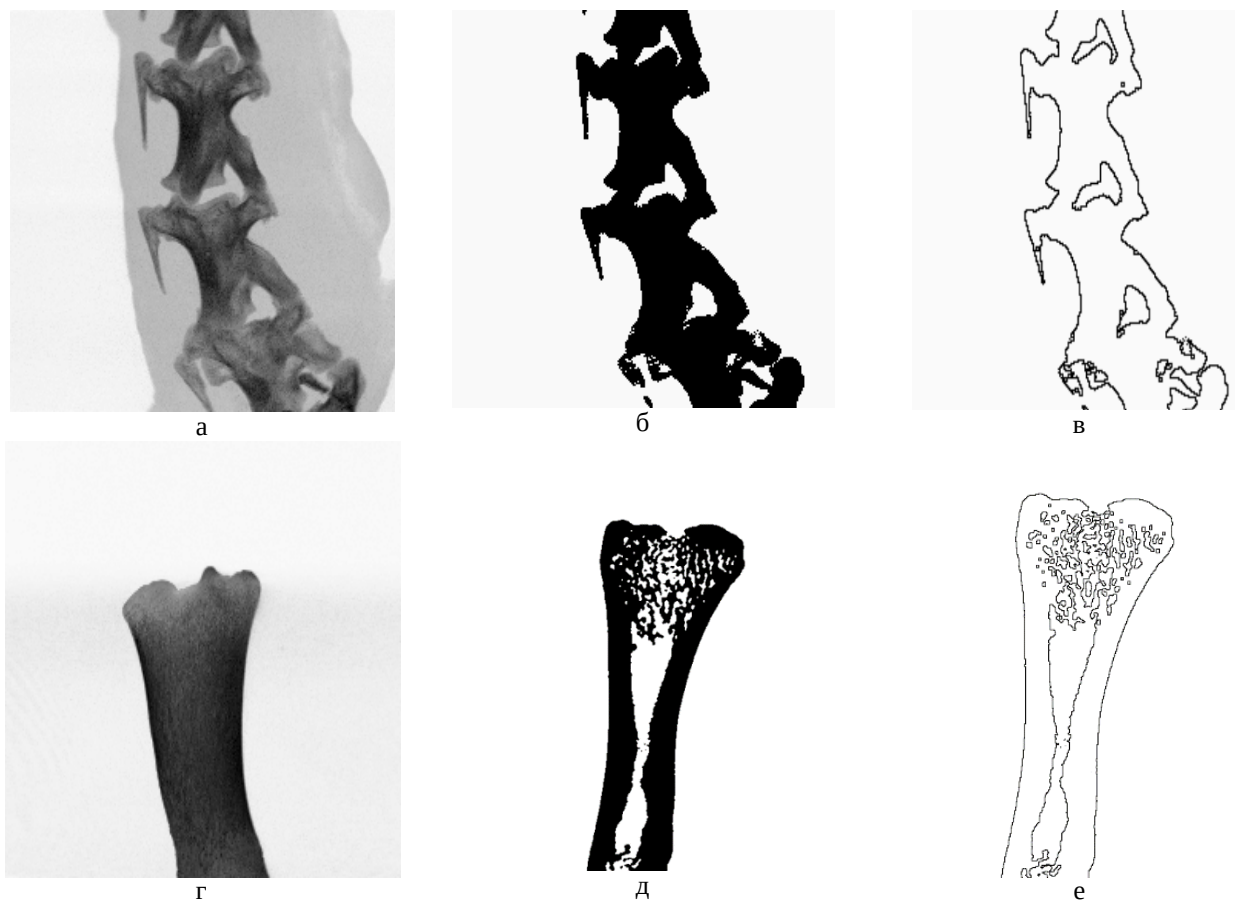


Рис. 2. Микро-КТ визуализация костной ткани: а, г – исходные срезы; б, д – бинаризация и сегментация пор; в, е – контуры пор после обработки

4. Обработка маски. На данном этапе основные преобразования связаны с применением фильтров сглаживания, обеспечивающих удаление шумов и улучшения геометрии выделенной области.

5. Создание 3D-модели. Данные, полученных на предварительных этапах, обрабатываются путем коррекции уровня освещения с последующим проведением рендеринга (рис. 3).

6. Сохранение результата в заданном формате.



Рис. 3. Результаты обработки изображений методом бинаризации для образцов костной ткани

Предложенный алгоритм заложен в качестве основы лабораторной работы по дисциплине «Компьютерные технологии в биотехнических системах» для студентов, обучающихся по направлению Биотехнические системы и технологии.

Библиографический список

1. Нигматуллина Г.Р., Давлетшин М.А. Компьютерная томография как современный метод исследования"
2. Кохан В.В., Григорьев М.В., Бузмаков А.В. Метод коррекции КТ-изображений пористых структур для повышения качества бинаризации // Сенсорные системы. – 2020. – Т. 34, № 2. – С. 147-155.
3. Кернешел В.В, Иванец О.Б., Мельников О.В. Оценка качества изображений компьютерной томографии.
4. Абрамов А.М. Учет нелинейной составляющей измерительного сигнала по связанным гистограммам при метрологических испытаниях АЦП // Вестник РГРТУ, № 88, 2024. – С. 95-105.
5. VolView - All-in-one Radiological Viewer (<https://volview.kitware.com/>).
6. Попова О.А. Разработка гибридного метода факторного анализа для неполного набора медицинских данных // Вестник РГРТУ, № 89, 2024. – С. 87-103.
7. Денисов А.А., Новиков А.И. Анализ методов детектирования, описания и сопоставления ключевых точек изображений // Вестник РГРТУ, № 89, 2024. – С. 104-116А.

УДК 615.47; ГРНТИ 76.13.19

РАЗРАБОТКА ИНФУЗИОННОГО НАСОСА

М.С. Огальцов

*Уфимский университет науки и технологий,
Российская Федерация, Уфа, pksogaltsov@mail.ru*

Аннотация. Работа посвящена разработке инфузионного насоса для автоматизированного дозированного введения жидкостей в организм пациента. В теоретической части рассмотрены цели инфузионной терапии, классификация растворов, методы введения и связанные риски. Проведен обзор современных моделей инфузионных насосов и анализ патентных решений, выявивший направления развития техники: повышение точности, безопасности и мобильности. На основе анализа предложено собственное устройство с обратной связью по частоте капель, включающее датчик капель, зажимной механизм и микроконтроллер. Разработка обеспечивает точность дозирования, безопасность пациента и удобство эксплуатации, может применяться в различных отделениях медицинских учреждений.

DEVELOPMENT OF AN INFUSION PUMP

M.S. Ogaltsov

*Ufa University of Science and Technology,
Russian Federation, Ufa, pksogaltsov@mail.ru*

The summary. The work is devoted to the development of an infusion pump for automated dosed administration of fluids into the patient's body. The theoretical part examines the goals of infusion therapy, classification of solutions, methods of administration and associated risks. A review of modern models of infusion pumps and an analysis of patent solutions were carried out, revealing directions for equipment development: improving accuracy, safety and mobility. Based on the analysis, our own device with drip rate feedback is proposed, including a drop sensor, a clamping mechanism and a microcontroller. The development ensures dosing accuracy, patient safety and ease of use, and can be used in various departments of medical institutions.

Infusion therapy is the controlled administration of various solutions and fluids into the body, primarily through an intravenous catheter, and is one of the fundamental methods of modern medicine. Today, infusion therapy is used in virtually all areas of clinical medicine, from resuscitation and intensive care to pediatrics, oncology, surgery, and obstetrics. Every day, millions of infusions are performed in medical institutions worldwide, saving patients' lives and maintaining their health. The significance of infusion therapy is so great that modern medicine cannot be imagined without this treatment method.[1]

This method is an integral part of modern clinical practice and is used to achieve several key goals. First and foremost, it involves maintaining hydration and replenishing circulating blood volume in cases of blood loss, burns, trauma, diarrhea, or vomiting. Maintaining an adequate level of hydration is critically important for the normal functioning of all organs and systems, as water participates in all biochemical processes, ensures the transport of nutrients and removal of metabolic products, and is involved in thermoregulation. Dehydration of even 10% leads to serious disorders, and a loss of 20-25% of fluid can be fatal. Replenishing circulating blood volume during blood loss helps prevent the development of hemorrhagic shock, maintain adequate blood pressure, and ensure oxygen delivery to vital organs: the brain, heart, kidneys, and liver. In emergency medicine, the speed of circulating blood volume replenishment is often the determining factor in patient survival.

Infusion therapy also allows for the administration of medications such as antibiotics, anticoagulants, and anesthetics, ensuring their rapid entry into the bloodstream and achievement of optimal concentration, bypassing the gastrointestinal tract. This is especially important in the treatment of severe infections, where it is necessary to quickly create a high concentration of antibiotic at the site of inflammation, during anesthesia, where the speed of onset of effect is critical, as well as in unconscious patients or those with swallowing disorders. Furthermore, many modern medications, including biological agents (monoclonal antibodies, enzymes, hormones), can only be administered parenterally, as they are destroyed in the gastrointestinal tract. Infusion administration al-

lows precise control over the rate of drug delivery, maintaining its therapeutic concentration for the required time and avoiding peak concentrations that can cause toxic effects.

An important task is the correction of electrolyte balance using special solutions, which is necessary for the normal functioning of cells and organs. Electrolytes such as sodium, potassium, calcium, magnesium, chloride, phosphates, and others are involved in forming cell membrane potential, conducting nerve impulses, muscle contractions (including heart muscle contractions), maintaining acid-base balance, activating enzymes, and many other processes. Electrolyte imbalances can occur in various diseases such as: renal failure, heart failure, liver cirrhosis, diabetes mellitus, as well as due to fluid losses from vomiting, diarrhea, through burn surfaces, and when taking diuretics. Correcting electrolyte disturbances with infusion therapy helps prevent severe complications: cardiac arrhythmias up to cardiac arrest, convulsive syndrome, muscle weakness, intestinal paresis, and consciousness disorders.

In addition, infusions can be used for parenteral nutrition, administration of contrast agents for diagnostic purposes, and even for combating toxic conditions by administering antidotes. Parenteral nutrition is a vital support method for patients who cannot receive nutrition naturally after extensive gastrointestinal surgeries, with severe inflammatory bowel diseases, pancreatitis, or in critical conditions accompanied by hypermetabolism. Modern solutions for parenteral nutrition contain all necessary components: amino acids, fats, carbohydrates, vitamins, and trace elements in balanced proportions, allowing the body's needs to be fully met over a long period. The administration of contrast agents is used in modern diagnostics for computed tomography, magnetic resonance imaging, angiography, urography, allowing visualization of pathological processes, assessment of organ function, and vascular condition. In poisoning cases, intravenous administration of antidotes quickly creates their effective concentration in the blood, and performing forced diuresis with the introduction of large fluid volumes accelerates the elimination of toxins by the kidneys.

Classification of Infusion Solutions and Administration Methods

Depending on the clinical task, different types of solutions are used: isotonic (with a salt concentration close to blood plasma), hypertonic (to increase osmotic pressure and draw fluid into the vessels), and hypotonic (for cell hydration). Isotonic solutions, which include the classic 0.9% sodium chloride solution (saline), as well as Ringer's solution, Hartmann's solution, Sterofundin, and other balanced salt solutions, are most widely used to replenish extracellular fluid losses, maintain hydration, and as solvents for medications. Hypertonic solutions, including 3-10% sodium chloride solutions, 20-40% glucose solutions, mannitol, are used to correct hyponatremia, reduce brain edema, and rapidly replenish circulating blood volume when there are limited possibilities for administering large fluid volumes. Hypotonic solutions, for example, 0.45% sodium chloride solution, are used to correct hypernatremia and cellular dehydration.

Administration methods also vary and include intravenous, intra-arterial, subcutaneous, intramuscular, intraosseous, and epidural routes, the choice of which is determined by specific indications. Intravenous administration is the most common and is performed through peripheral or central veins. Peripheral venous access is used for short-term therapy and administration of solutions that do not have an irritating effect. Central venous access (subclavian, jugular, femoral veins) is necessary for long-term infusion therapy, administration of hyperosmolar solutions, and monitoring central venous pressure. Intra-arterial administration is used less frequently, mainly for regional chemotherapy or in some critical conditions. Subcutaneous administration is used for slow rehydration, especially in geriatrics, as well as for administering certain drugs (insulin, low molecular weight heparins). Intraosseous administration is the method of choice when rapid venous access cannot be achieved in emergency situations, especially in children. Epidural administration is used for long-term analgesia and anesthesia.

Risks and the Need for Monitoring in Infusion Therapy

Despite its high effectiveness, infusion therapy is associated with certain risks, including allergic reactions, infectious complications, air embolism, vascular damage, and excessive fluid administration. Allergic reactions can occur to any component of the infusion solution or the materials of the administration set and can range from mild skin rashes to life-threatening anaphylactic shock. Infectious complications are associated with violations of aseptic rules during catheter insertion, solution preparation, and infusion procedures, and can manifest as local infiltrates, thrombophlebitis, and with central venous access, catheter-related bloodstream infections and sepsis. Air embolism, although a rare complication, can lead to severe consequences if even small volumes of air enter the vascular bed. Vascular damage can occur during traumatic catheterization, long-term catheter placement, or administration of aggressive solutions. Excessive fluid administration (hypervolemia) is especially dangerous in patients with heart and renal failure, leading to overload of the pulmonary circulation, pulmonary edema, and exacerbation of heart failure. This necessitates continuous monitoring of the patient's condition and the use of high-precision equipment, such as infusion pumps, which ensure accurate dosing, control of infusion rate, alarms in case of emergencies, and integration into patient monitoring systems.

Review of Modern Infusion Pumps

This work reviews existing models of infusion pumps on the market, allowing an assessment of current trends in the development of this type of medical equipment. Infusion pumps, or infusion devices, are devices for the precise, metered administration of fluids into a patient's body over a given time. Unlike traditional drip sets, where the infusion rate is adjusted manually and depends on many factors (height of the fluid container, solution viscosity, patient position, venous pressure), infusion pumps provide a constant infusion rate regardless of these factors. This is especially important when administering drugs with a narrow therapeutic window – vasopressors, antiarrhythmics, insulin, heparin, cytostatics – where even small deviations in the infusion rate can lead to insufficient effectiveness or toxic effects. Modern infusion pumps are classified by operating principle into volumetric peristaltic (rotary and linear), syringe, and piston pumps, and by functionality into single- and multi-channel, stationary and portable, with basic and advanced functions.

The SINO SN-50C6 infusion pump was reviewed, representing a volumetric peristaltic pump designed for long-term and precise administration of solutions. Peristaltic pumps operate on the principle of sequentially compressing a flexible tube with rollers or finger-like elements, propelling the fluid. Advantages of such pumps include ease of use, the ability to work with standard infusion sets, and no contact of mechanical parts with the solution, ensuring sterility. [2] The SINO SN-50C6 pump provides all necessary operating modes and can be used in various departments: general wards, intensive care units, oncology, maternity hospitals, pediatrics. Such pumps are especially widely used by anesthesiologists and intensivists, where long-term and precise drug administration is required.

Two models from Mindray, one of the world leaders in medical equipment manufacturing, are described in more detail. The BeneFusion VP1 Vet pump, specialized for veterinary use, is characterized by its compactness, light weight, high infusion accuracy, sensitive air bubble detector (detecting bubbles as small as 50 μ l), and the ability to display pressure dynamics to prevent occlusions caused by animal movements. Veterinary application of infusion pumps has its own specifics; animals cannot remain still during the procedure, so the pressure monitoring system allows timely detection of tube kinks or catheter blockage. Compactness and the presence of a built-in battery allow the pump to be used during animal transport and in field conditions. High dosing accuracy is especially important when treating small animals, where an error of even one milliliter can be critical.

The BeneFusion VP3 model is a reliable and compact device for general infusion, equipped with a convenient carrying handle, a large monochrome LCD screen, and a battery providing up to 4-8 hours of autonomous operation. This device is positioned as a universal solution for various hospital departments. The large screen ensures ease of use and clear display of all infusion parameters – rate, volume infused, line pressure, battery charge. The intuitive interface allows for quick mastery of the pump's operation, which is especially important in the intensive workflow of medical staff. Battery operability allows the pump to be used during patient transport within the hospital and between facilities, as well as during temporary power outages. These examples demonstrate the key development directions for devices: miniaturization, increased accuracy, improved safety systems, and ensuring mobility.

Analysis of Patent Solutions

A significant part of the analytical work is devoted to the study of patent solutions in the field of infusion pumps. Patent analysis allows the identification of promising technical ideas and the identification of shortcomings in existing analogues to justify the authors' own development. Patent searching is a crucial stage in any engineering development, allowing not only assessment of the existing state of the art but also avoidance of infringing on others' patent rights, as well as finding technical niches free for development.

One of the reviewed patents emphasizes the importance of creating innovative pumps, especially for outpatient treatment of patients with diabetes or oncological diseases requiring continuous maintenance therapy. Outpatient infusion pumps represent a special class of devices that must be as compact, light, economical, and easy to use as possible, so that the patient can operate them independently at home. For patients with type 1 diabetes, insulin pumps have become a true breakthrough, allowing near-normal glycemia to be maintained and significantly reducing the risk of diabetes complications. For oncology patients needing long-term infusion chemotherapy, outpatient pumps allow treatment in comfortable home conditions without interrupting their usual lifestyle. The technical solution proposed in this patent aims to increase the accuracy and reliability of the device through a new method of generating oscillation frequency in the oscillator circuit; however, the complexity of the design and low reliability of the sensitive part of the position sensor are noted as disadvantages. These shortcomings are a typical problem for many innovative solutions, where the pursuit of increased functionality leads to design complexity and reduced overall reliability.

Another patent describes an infusion pump for parenteral and enteral nutrition with a complex control system for a synchronous multi-phase motor. The device includes a roller pump, a three-phase sequencer, and current source control units that generate three sinusoidal signals with phase shifts of 0° , 120° , and 240° . This scheme allows connecting the motor windings to the current source according to a sinusoidal law with precisely calculated time intervals, ensuring smoothness and high accuracy of the pump drive operation. Sinusoidal control of brushless DC motors is a modern approach, ensuring maximum smoothness of movement, minimal pulsations, and high positioning accuracy. [3] In the context of infusion pumps, this ensures uniformity of fluid flow, which is especially important when administering small volumes and when using high-precision syringe pumps. The technical implementation of such control is quite complex and requires the use of specialized microcontrollers and drivers, but it provides a significant improvement in operational characteristics.

Of particular interest is the patent "Infusion Device for Administering Liquids in a Wide Range of Transparency," which focuses on increasing the safety of infusion therapy. This device uses a photometric air sensor, allowing real-time monitoring of the presence of bubbles in the system's fluid path. The operating principle of the photometric sensor is based on the difference in optical properties of liquid and air – liquid transmits or scatters light differently than air, allowing even microbubbles to be reliably detected. The control unit analyzes the sensor signals and, upon

detecting anomalies, corrects the operation of the peristaltic pump, minimizing the risk of air embolism. Modern safety requirements mandate the presence of air detectors in infusion pumps, especially for central venous access, where even a small air bubble can be dangerous. The advantages of this solution are high accuracy and reliability of bubble detection, the possibility of continuous process monitoring, as well as increasing the overall safety of procedures and reducing the risk of complications for patients. All the reviewed patents emphasize the importance of continuous improvement of infusion technology, aimed at enhancing the quality and safety of treatment.

Own Development of an Infusion Pump

Block diagram of the developing infusion pump is on the figure 1.

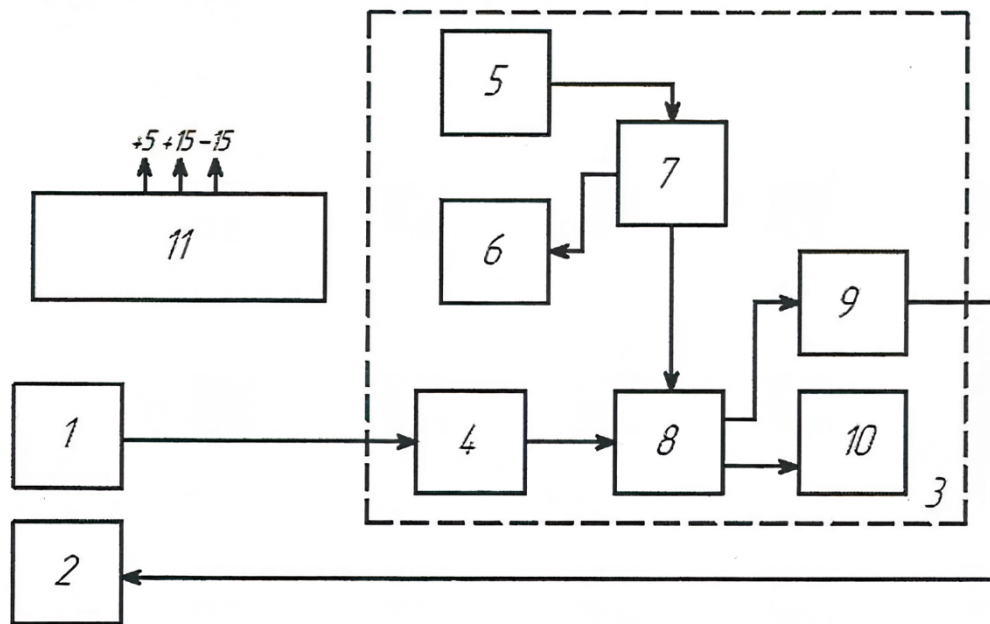


Fig. 1. Block diagram of the infusion pump. 1 – Drop sensor, 2 – Clamping device, 3 – Control unit, 4 – Drop signal shaper, 5 – Keyboard unit, 6 – Display unit, 7 – Microcontroller, 8 – Drop frequency analyzer, 9 – Current switch, 10 – Audible alarm unit, 11 – Power supply unit

Based on the conducted analysis, the paper proposes its own design solution for an infusion pump. From the description of the operating principle of the developed device, it follows that it represents an automated drip control system with feedback on drop rate. The device includes a drop sensor that generates a signal as each drop passes; a clamping device acting as an actuator to compress the polymer tube; a keyboard and display unit for user interaction; as well as a microcontroller and a drop frequency analyzer, which together form the control and comparison unit. The device's operating algorithm begins with a preparatory stage, including securing the fluid container and polymer tube in the clamping device, as well as initiating the "Prime" mode to remove air from the system. Then, using the keyboard, the required infusion rate is set, displayed on the indicator, and the "Start" button is pressed. The clamping device opens the tube, and drops begin to fall. Each passing drop is detected by the sensor, which sends a signal to the analyzer. The analyzer compares the actual drop arrival rate with the reference rate set by the microcontroller. When these values match and the "Start" button is pressed, a control signal is generated, which opens the current switch and the clamping device, allowing the next drop to fall. Thus, the system constantly maintains the set infusion rate, ensuring accuracy and reliability of the process.

Thus, as a result of the research, a comprehensive analysis of the subject area was conducted, modern analogues and patent solutions were studied, based on which a device for an infusion pump with feedback on drop rate was developed. The conducted analysis showed that infusion therapy is a complex and multifaceted treatment method requiring the use of high-precision and reliable

equipment. The modern market for infusion pumps offers a wide range of devices for various purposes – from simple single-speed to complex multi-channel programmable systems with the ability to integrate into hospital information systems. The analysis of patent literature revealed the main directions of technological development: increasing dosing accuracy, improving safety systems, miniaturization, increasing autonomy, and improving user interfaces.

The proposed solution meets the main requirements for modern infusion technology: it provides dosing accuracy, patient safety (due to automatic control and the ability to remove air), and ease of use. The use of drop rate feedback allows automatic maintenance of the set infusion rate, compensating for changing conditions. The presence of the "Prime" mode ensures reliable removal of air from the system before starting the infusion. The intuitive interface with keyboard and indicator allows for quick mastery of the device's operation.

The development can find application in various departments of medical institutions for infusion therapy requiring precise adherence to the rate of fluid and drug administration. Potential consumers could include intensive care and resuscitation units, anesthesiology, oncology, surgery, pediatrics, as well as emergency medical services. With appropriate refinement, the device could be adapted for use in veterinary medicine. Further directions for the development of the device may include expanding functionality (multi-channel capability, programmable protocols, integration with patient monitoring systems), improving characteristics (increasing accuracy, increasing autonomy), as well as creating specialized modifications for specific areas of application. The work has both theoretical and practical significance, contributing to the development of national medical technology and import substitution in this important area.

Bibliography

1. Shchedrina E. A. Peculiarities of infusion therapy. : diss. Cand. Bio. Sciences: -M., 2000.- Access mode: <https://antiage-expert.com/ru/blog/osobennosti-infuzionnoy-terapii/> (Accessed 21.11.2025)
2. Patent No. RU2579620C2 Russia. Infusion pumps: appl. 2011-09-23; publ. 2014-10-27
3. Patent No. SU1346163A1 Russia. Infusion pump: appl. 1985.12.30 publ. 1987.10.23 / Lyanov Nikolay Alexandrovich – 4 p.

УДК 681.518: 66.011; ГРНТИ 50.53.15

ГРАФИЧЕСКИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЙ ИНТЕРФЕЙС ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОТВЕРЖДЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

О.С. Дмитриев^{1,2}, Н.Ю. Маренков¹, А.О. Дмитриев¹

¹Тамбовский государственный технический университет,
Россия, Тамбов, phys@tstu.ru,

²Российская академия естественных наук

Аннотация. В статье рассмотрены основные принципы построения графического пользовательского интерфейса информационно-измерительной системы исследования, моделирования и оптимизации процесса отверждения полимерных композитов, содержащей в своем составе специальные аппаратно-технические средства, а также математическое, алгоритмическое, метрологическое и программное обеспечение. Приведены требования к построению интерфейса, включающие простоту использования, дружелюбность, естественность и функциональность. Предложенный интерфейс позволяет повысить эффективность исследований и проектирования технологического процесса производства полимерных композитов. *Ключевые слова:* графический пользовательский интерфейс, информационно-измерительная система, моделирование, оптимизация, полимерные композиты.

GRAPHICAL USER INTERFACE OF INFORMATION AND MEASURING SYSTEM FOR STUDYING AND SIMULATING THE CURING PROCESS OF POLYMER COMPOSITES

O.S. Dmitriev^{1,2}, N.Yu. Marenkov¹, A.O. Dmitriev¹

¹Tambov State Technical University, Russia, Tambov, phys@tstu.ru,

²Russian Academy of Natural Sciences

The summary. The paper considers the basic principles of constructing a graphical user interface for an information and measurement system for research, modeling, and optimization of the curing process of polymer composites, which contains special hardware and technical means, as well as mathematical, algorithmic, metrological, and software support. The requirements for the interface design include ease of use, user-friendliness, naturalness, and functionality. The proposed interface improves the efficiency of research and design of polymer composite manufacturing processes.

Keywords: graphical user interface, information and measuring system, simulation, optimization, polymer composites.

В числе новых конструкционных материалов важные позиции занимают полимерные композиты (ПК), поскольку обладают неоспоримым преимуществом по сравнению с традиционными металлическими материалами, т.к. свойства ПК на этапе разработки материала и изделия можно проектировать в соответствии с необходимыми условиями применения. Технология производства изделий из ПК представляет собой сложный химико-технологический процесс, предполагающий формообразование изделия с установкой вспомогательных элементов конструкции (например, сотового заполнителя) и термическую обработку – отверждение [1, 2]. В процессе термообработки, при достижении температуры начала отверждения, связующее входит в стадию активизации. В результате образуется сетчатая структура полимера. При этом процесс происходит с выделением тепла и при неконтролируемом проведении термообработки может приводить к перегревам. Поэтому термообработку проводят по некоторому строго определенному техпроцессу, предотвращающему возникновение перегревов внутренних слоев изделия и температурных градиентов, превышающих допустимые значения, что позволяет получать качественные изделия из ПК с запланированными физико-механическими характеристиками. Нахождение такого режима термообработки и отверждения, как правило, выполняют путем математического моделирования процесса тепло- и массопереноса, его оптимизации и идентификации характеристик ПК. В результате математического моделирования реализуется возможность численно проверить различные технологические схемы компоновки технологического пакета, исследовать влияние на режим различных формообразующих оснасток, толщины дренажных слоев и пр. [2, 3].

Для математического моделирования необходимы параметры модели, которые можно взять из имеющейся базы данных или определить экспериментально, исследуя препрег ПК. К параметрам модели относятся конструкционные особенности изделия, его геометрические размеры, количество слоев препрега, коэффициент наполнения и свойства материала, такие как теплофизические характеристики (ТФХ): теплоемкость C и теплопроводность λ , а также кинетические характеристики: мощность тепловыделений W и тепловой эффект реакции отверждения Q , на основе которых определяются энергия активации E и кинетическая функция $f(\beta)$ процесса отверждения ПК [2 – 5]. Для определения характеристик ПК, моделирования процесса тепло-массопереноса и расчета оптимального режима отверждения изделий из ПК была разработана информационно-измерительная система (ИИС) процесса отверждения, содержащей в своем составе специальные аппаратно-технические средства, а также математическое, алгоритмическое, метрологическое и программное обеспечение, ориентированное на решение прямых, обратных и оптимизационных задач. Описание построения и некоторые аспекты этапов её разработки были представлены ранее в работах [5, 6].

В состав программного обеспечения ИИС входят модули управления экспериментом, модули расчета и вспомогательные модули. Для взаимодействия экспериментатора с ИИС

был разработан графический пользовательский интерфейс, сочетающий в себе простоту использования, дружелюбность, естественность и функциональность. На основе опыта имеющихся, наиболее распространенных программных оболочек, например Windows, разработанный пользовательский интерфейс ИИС построен по принципу окон с соответствующим меню в виде предлагаемых задач. При работе с ИИС в интерактивном режиме из меню выбираются необходимые для выполнения задания, открываются соответствующие окна и осуществляются определенные действия системы. Главное графическое окно с предлагаемым меню пользовательского интерфейса ИИС показано на рис. 1.

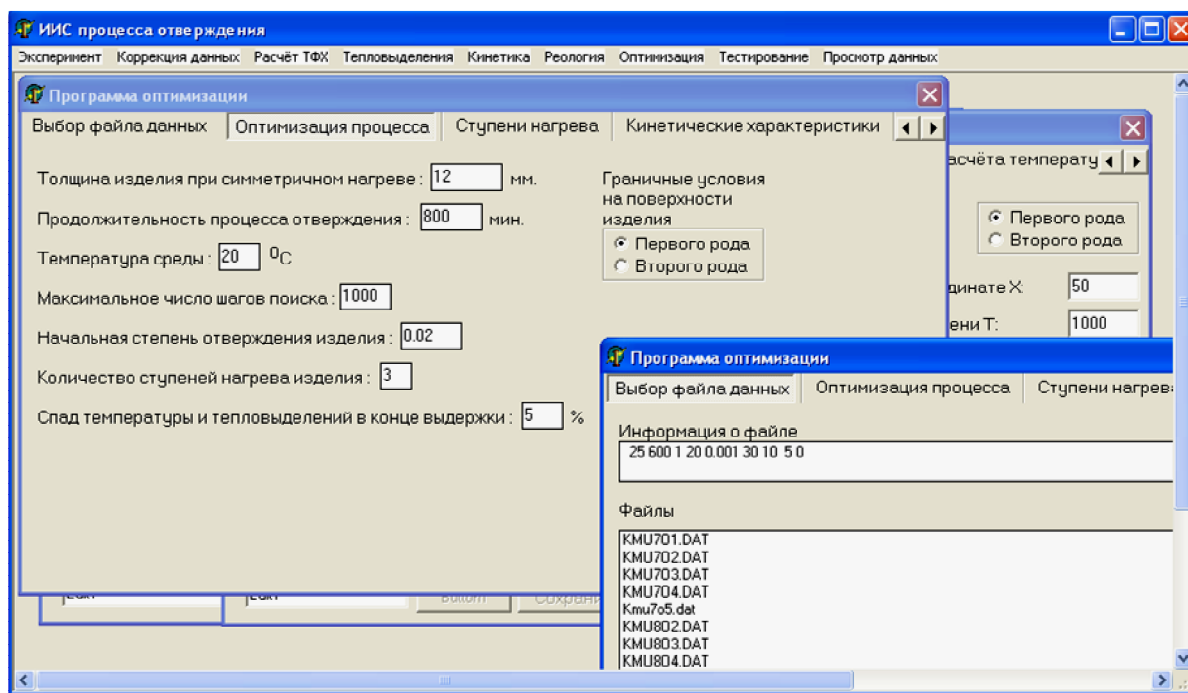


Рис. 1. Главное графическое окно пользовательского интерфейса ИИС

Программное обеспечение и пользовательский интерфейс ИИС выполнены в интегрированной среде разработки Borland Delphi и представляют собой MDI-приложение, в которую программы системы входят как модули. Для облегчения работы с ИИС программная оболочка оснащена комментариями и имеет возможность подсказывать варианты действия пользователя с возможным результатом работы системы. При этом все действия системы отображаются на экране.

В главном графическом окне в верхней строке приведены все программы ИИС, и пользователь имеет возможность выбрать необходимый путь работы с системой. Здесь можно выбрать проведение эксперимента с запуском аппаратно-технического комплекса, провести коррекцию экспериментальных данных с вычислением поправок, выполнить расчеты ТФХ, кинетических или реологических характеристик, протестировать программы расчета, провести моделирование или расчет оптимального режима отверждения, просмотреть выполненные ранее расчеты, которые были сохранены в базе данных ИИС. Программы моделирования и расчета оптимального режима отверждения являются основными, которые выдают результат работы ИИС. Все остальные программы являются вспомогательными, служащие для снабжения программ расчета режима отверждения необходимыми данными.

При исследовании новых материалов основной источник исходных данных о свойствах материала является экспериментальное исследование с помощью ИИС с последующим расчетом этих свойств. Результаты исследований материала записываются в базу данных ИИС под уникальным именем, например КМУ7TW23.dat, соответствующим типу композита,

например КМУ-7, типу эксперимента, отверждение препрега (TW) или нагрев (ТС) отвержденного образца ПК и номера эксперимента. После расчета свойств по этим данным создается файл с именем, в котором изменяются буквы типа эксперимента, например (СС) – ТФХ отвержденного ПК, (СW) – эффективные ТФХ, (СЕ) – ТФХ в процессе отверждения, (W) – мощность тепловыделений, (К) – кинетические характеристики, (О) – оптимизационные или модельные расчеты, (R) – результаты оптимизационных расчетов в виде таблиц, пригодных для передачи технологам на производство. Таким образом, ввод данных для модуля расчета процесса отверждения осуществляется путем выбора соответствующего файла из базы данных ИИС. Ввод свойств материала из базы данных также показан на рис. 1.

В случае, когда необходимо выполнить расчеты процесса отверждения или имитационный эксперимент по данным, полученным на других экспериментальных установках, в пользовательском интерфейсе ИИС предусмотрен второй вариант задания свойств ПК. Для этого используется параболическая функция, задаваемая по трем точкам. Пример ввода функциональных зависимостей свойств материала представлен на рис. 2.

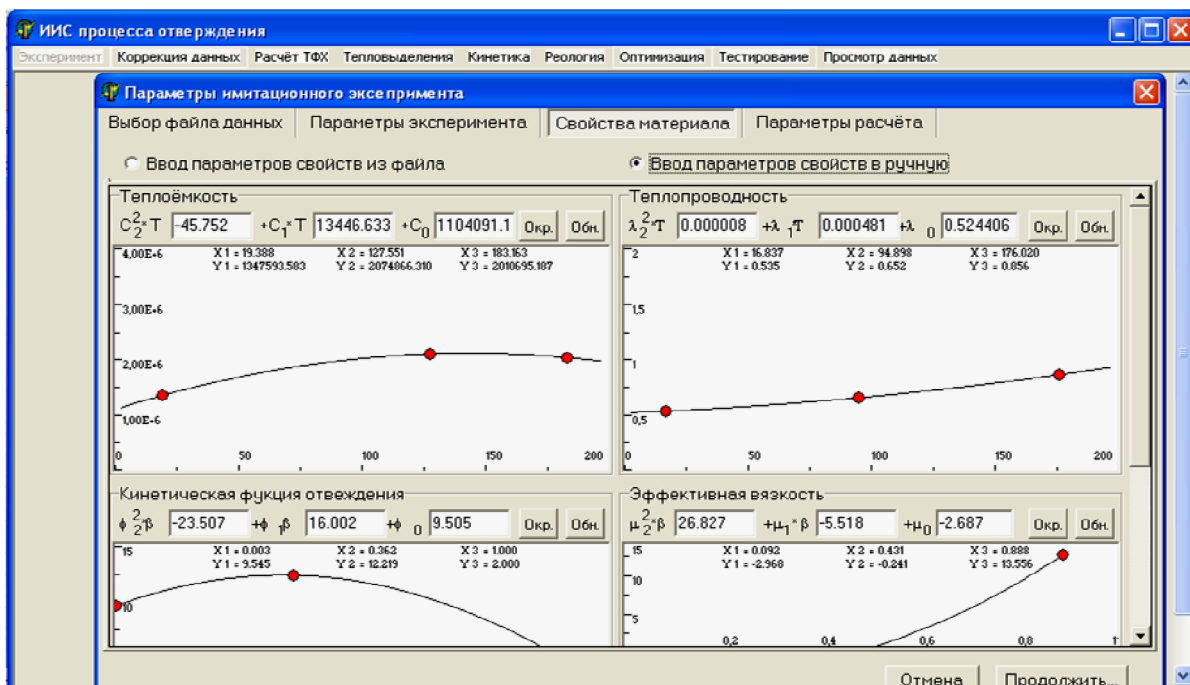


Рис. 2. Ввод функциональных зависимостей свойств ПК

Передвигая красные точки внутри окна, задается вид экспериментальной зависимости, соответствующий переданным данным. Кроме того, в этом окне предусмотрен вывод координат X , Y каждой точки и коэффициенты полученной параболической зависимости, например $C(T) = C_2 T^2 + C_1 T + C_0$. Для удобства записи и дальнейшего использования полученной аппроксимирующей кривой в окне предусмотрено округление параметров параболы. Вводимые экспериментальные зависимости для кинетической функции $\phi(\beta)$ и структурной составляющей вязкости $\tilde{\mu}(\beta)$ имеют особенность, в отличие от ТФХ они изображаются в полупологарифмических координатах $\ln\phi(\beta)$, $\ln\tilde{\mu}(\beta)$, что также предусмотрено в ПО ИИС.

По введенным данным из файла или вручную при моделировании или расчете процесса отверждения производится численное решение системы нелинейных дифференциальных уравнений теплопроводности, массопереноса, кинетики и реологии с произвольно заданными нелинейными параметрами, в основу которых положены конечно-разностные итерационные схемы. Алгоритмы численного решения этих уравнений описаны в [2 – 6].

При моделировании сначала вводятся параметры изделия: толщина, длина, ширина, количество слоёв препрега, тип и толщина формообразующей оснастки, наличие сотового заполнителя и других элементов конструкции, количество дренажных слоев и т.д. Далее вводятся параметры процесса отверждения: продолжительность процесса, начальная степень отверждения, примерный температурно-временной режим, максимальная температура, давление на изделие и моменты его приложения. Вводятся параметры решения системы дифференциальных уравнений: граничные условия, количество разбиений по координате и времени, точность сходимости решения. При моделировании ступенчатого нагрева применяются граничные условия первого рода и вводятся количество ступеней, скорость нагрева, температура и время выдержки. При моделировании монотонного нагрева используется граничное условие второго рода и вводится скорость нагрева. Вводится число точек по толщине технологического пакета и период вывода данных по времени. В случае имитационного моделирования эксперимента вводятся его параметры: период опроса датчиков по времени и их количество по толщине образца, а также максимальная температура и продолжительность эксперимента. Пример ввода параметров моделирования в ИИС представлен на рис. 3.

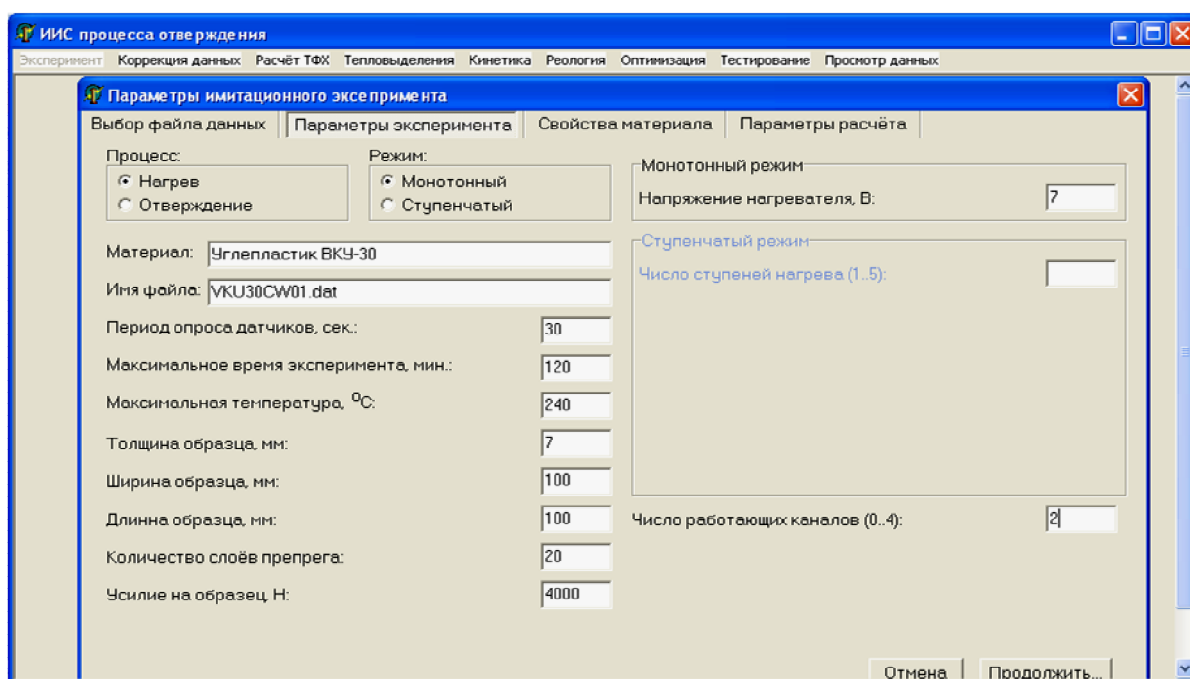


Рис. 3. Ввод параметров моделирования процесса отверждения в ИИС

Результатом работы модуля имитационного моделирования эксперимента является расчет температурно-конверсионного поля, которое загружается в файл, соответствующий файлу экспериментальных данных и используется для тестирования расчетных модулей. Кроме того, результаты расчетов выводятся таблично для пяти точек по толщине образца и для 200...500 точек по времени, а также отображаются графически, включая графики температуры T , мощности тепловыделений W , степени отверждения β для двух точек по толщине, график максимального градиента температуры G , график усадки толщины L образца. Графическое представление вывода результатов расчета показано на рис. 4.

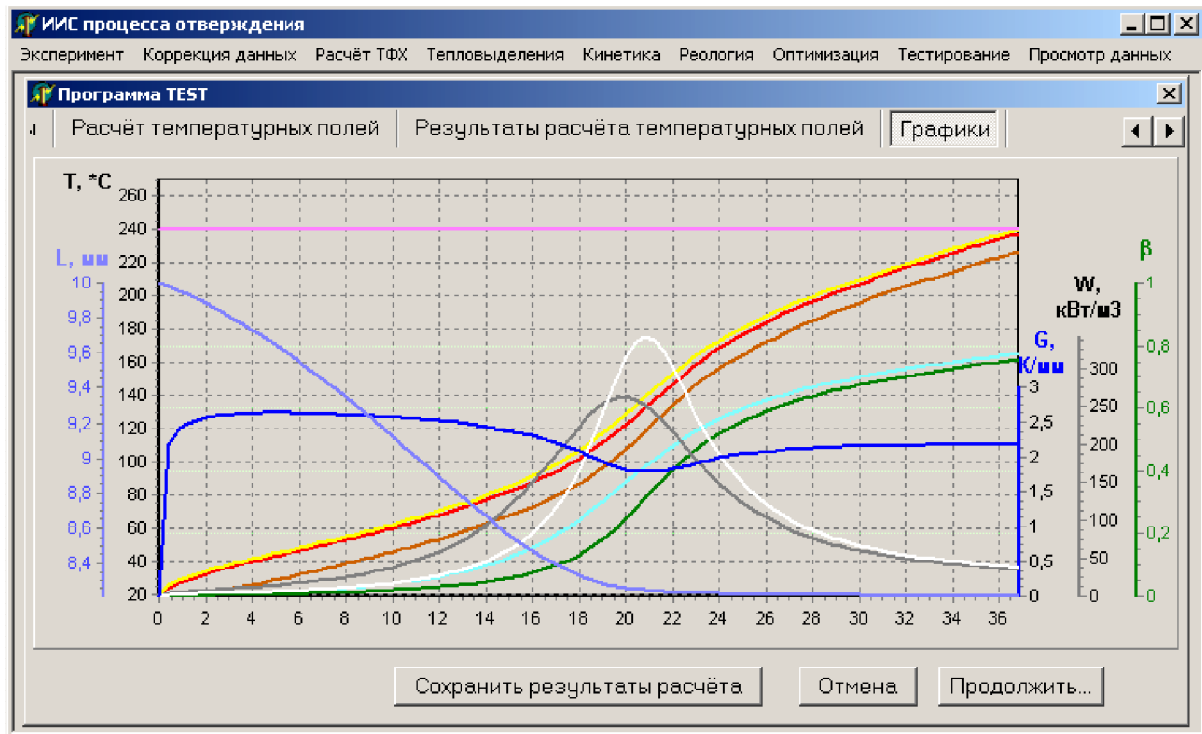


Рис. 4. Вывод результатов моделирования процесса отверждения в ИИС

Представленный графический пользовательский интерфейс ИИС исследования и моделирования процесса отверждения позволяет пользователю системы быстро осваивать работу с ИИС и использовать ее для проектирования техпроцесса получения изделий из ПК, проработав различные варианты схемы компоновки укладки технологического пакета.

Библиографический список

1. Каблов, Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. – 2020. – Т. 90, № 4. – С. 331 - 334.
2. Дмитриев, О.С. Определение оптимальных режимов отверждения толстостенных изделий из полимерных композитов / О.С. Дмитриев, В.Н. Кириллов, А.О. Дмитриев, А.В. Зуев // Тепловые процессы в технике. – 2013. – Т. 5. № 10. – С. 467 - 475.
3. Дмитриев, О.С., Математическая модель процесса автоклавного отверждения изделия из полимерного композиционного материала с сотовым наполнителем в технологическом пакете / О.С. Дмитриев, Ф.А. Насонов, Б.Б. Морозов, Н.Ю. Маренков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2025. Т. 31. № 3. С. 362-371.
4. Дмитриев, О.С. Моделирование теплофизических характеристик полимерных композитов в процессе отверждения / О.С. Дмитриев, А.А. Барсуков, Д.Я. Баринов // Теплофизика и аэромеханика. – 2024. – Т. 31. № 2. – С. 355-370.
5. Дмитриев, О.С. Интеллектуальная информационно-измерительная система для определения теплофизических характеристик полимерных композитов / О.С. Дмитриев, А.А. Живенкова, А.О. Дмитриев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2013. Т. 19. № 1. С. 73-83.
6. Живенкова, А.А. Алгоритмическое и программное обеспечение информационно-измерительной системы исследования теплофизических характеристик полимерных композитов в процессе отверждения / А.А. Живенкова, О.С. Дмитриев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2014. – Т. 54. № 4. – С. 212-217.

УДК 621.317.421.2; ГРНТИ 59.29.35

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СКАНИРОВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИНДУКТОРА КОМПЛЕКСА ХРОНОМАГНИТОТЕРАПИИ

С.Г. Гуржин, А.С. Тоголов, А.В. Шуляков

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, gurzhin@mail.ru

Аннотация. Предложена автоматизированная система сканирования и измерения распределения магнитного поля индуктора, который используется в комплексе хрономагнитотерапии «Релаксмаг». Разработан и реализован макетный образец системы на базе компьютера, позволяющий с высокой точностью и разрешением с помощью программ виртуальных приборов в среде LabVIEW автоматически позиционировать в пространстве трехосевой датчик магнитного поля и индуктор относительно друг друга, а также регулировать и задавать в двух координатах и определенных диапазонах шаги их перемещения.

Ключевые слова: индуктор комплекса хрономагнитотерапии, измерение распределения магнитного поля, трехосевой датчик Холла, устройство линейного перемещения, драйвер шагового двигателя, контроллер Arduino Nano, виртуальные приборы.

AUTOMATED SYSTEM FOR SCANNING AND MEASURING THE DISTRIBUTION OF THE MAGNETIC FIELD OF THE INDUCTOR CHRONOMAGNETOTHERAPY COMPLEX

S.G. Gurzhin, A.S. Togulov, A.V. Shuljakov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, gurzhin@mail.ru

Annotation. An automated system for scanning and measuring the magnetic field distribution of an inductor used in the Relaxmag chronomagnetotherapy system has been proposed. A computer-based prototype has been developed and implemented. Using virtual instrumentation programs in LabVIEW, this system allows for automatic spatial positioning of a three-axis magnetic field sensor and inductor relative to each other with high accuracy and resolution, as well as adjustment and setting of their movement in two coordinates and within specific ranges.

Keywords: Chronomagnetotherapy complex inductor, magnetic field distribution measurement, three-axis Hall sensor, linear motion device, stepper motor driver, Arduino Nano controller, virtual instruments.

Одним из основных и очень важных аппаратных средств комплексов магнитотерапии «Мультимаг» и «Релаксмаг» является полеформирующая система, излучающая на пациента лечебное магнитное поле (МП), и состоящая из определенного множества электромагнитов (индукторов) [1]. Биотропные параметры создаваемого МП, такие как интенсивность, концентрация, градиент, пространственная неоднородность, локализация, скорость изменения вектора магнитной индукции на дискретных участках и другие, во многом зависят от электрических и физических свойств и характеристик индукторов [2]. Поэтому на этапах разработки, изготовления и серийного производства индукторов возникает необходимость постоянного контроля этих характеристик с целью их оптимизации по выбранным критериям.

Для интегрального и наглядного представления картины МП и его биотропных параметров в рабочей области индуктора предложено использовать метод построения **распределения МП**. Поскольку габаритные размеры индуктора небольшие $36 \times 18 \times 9$ мм³ и интерес представляет распределение МП, направленного только в сторону пациента, то была поставлена задача спроектировать и реализовать макетный образец автоматизированной системы на базе компьютера, позволяющей автоматически с помощью аппаратно-программных средств управлять процессом сканирования МП, излучаемого индуктором при протекании по нему тока, в плоскости X-Y и измерять магнитную индукцию в заданных координатных точках с высокой точностью и разрешением.

В качестве основных элементов, осуществляющих равномерное сканирования МП

индуктора по двум координатным осям X-Y, были выбраны электромеханические приводы линейного перемещения на основе шаговых двигателей (ШД) [3, 4], в соответствии с техническими характеристиками которых разработана структура автоматизированной системы (рис. 1).

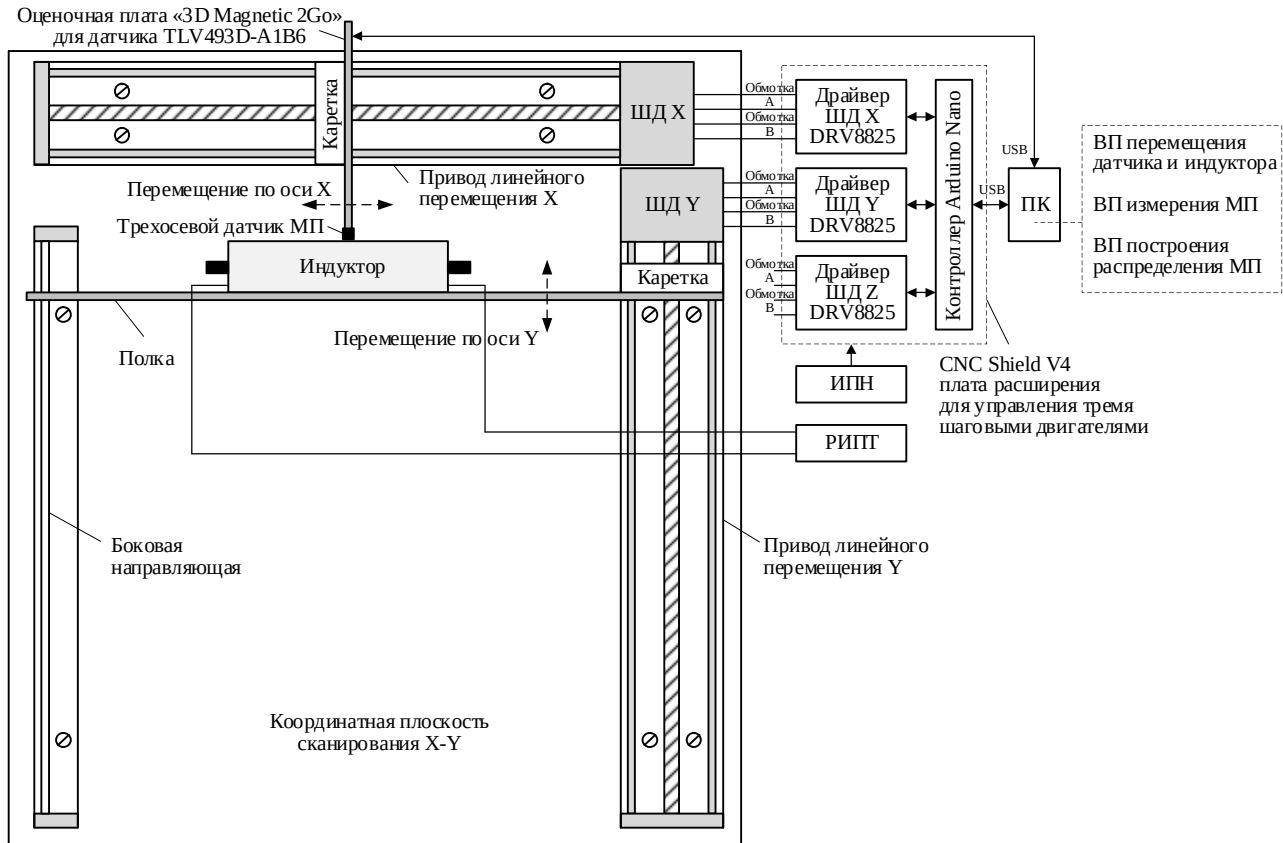


Рис. 1. Структура автоматизированной системы сканирования и измерения распределения магнитного поля индуктора комплекса магнитотерапии «Релаксмаг»

Система состоит из координатной плоскости сканирования X-Y, к которой ортогонально крепятся два привода линейного перемещения с ШД модели «С 80 mm Stroke» [3] (рис. 2, в), оценочной платы «3D Magnetic 2Go» с трехосевым датчиком МП – TLV493D-A1B6 [5, 6] (рис. 3), одиночного индуктора комплекса магнитотерапии «Релаксмаг» (рис. 2, б), регулируемого источника постоянного тока (РИПТ) OWON SPE3102 [7] (рис. 2, а), платы расширения CNC Shield V4 для управления ШД линейных приводов [8] (рис. 2, г), источника постоянного напряжения (ИПН) в виде стандартного сетевого адаптера напряжения, персонального компьютера (ПК) и трех программ виртуальных приборов (ВП) в среде LabVIEW для перемещения датчика и индуктора по координатам X и Y, измерения МП и построения распределения МП.

Исследуемый индуктор закрепляется на полке, которая с одной стороны крепится к каретке привода линейного перемещения Y, а с другой стороны скользит по боковой направляющей. Ток в индукторе задается и регулируется с помощью РИПТ, который представляет собой одноканальный высокостабильный и точный источник питания мощностью 200 Вт, с разрешающей способностью по напряжению и току 10 мВ/1 мА, низким уровнем пульсаций и шума. Выходные напряжение и ток могут изменяться в диапазонах 0÷30 В и 0÷10 А.

Приводы линейного перемещения выбраны модели «С 80 mm Stroke» с двухфазным ШД, винтовой передачей, ходом каретки 80 мм, диаметром винта 3 мм и шагом резьбы винта 0,5 мм. Рабочее напряжение и ток для обмоток привода лежат в пределах 4÷9 В и 0,1÷0,5 А

соответственно.

Управление ШД линейных приводов X и Y производится программой ВП перемещения датчика и индуктора с ПК по USB порту через плату расширения CNC Shield V4, содержащую три драйвера ШД DRV8825 [9] по осям X, Y, Z и контроллер Arduino Nano V3 R3 на базе Atmega328P [10], который обеспечивает стандартное, согласованное и быстрое взаимодействие аппаратных и программных средств.

Модули драйверов ШД имеют напряжение питания $2,5 \div 5,25$ В и могут работать в режимах с дроблением основного шага перемещения: 1/1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 (микрошаговое разрешение), что позволяет с высокой точностью позиционировать каретку.

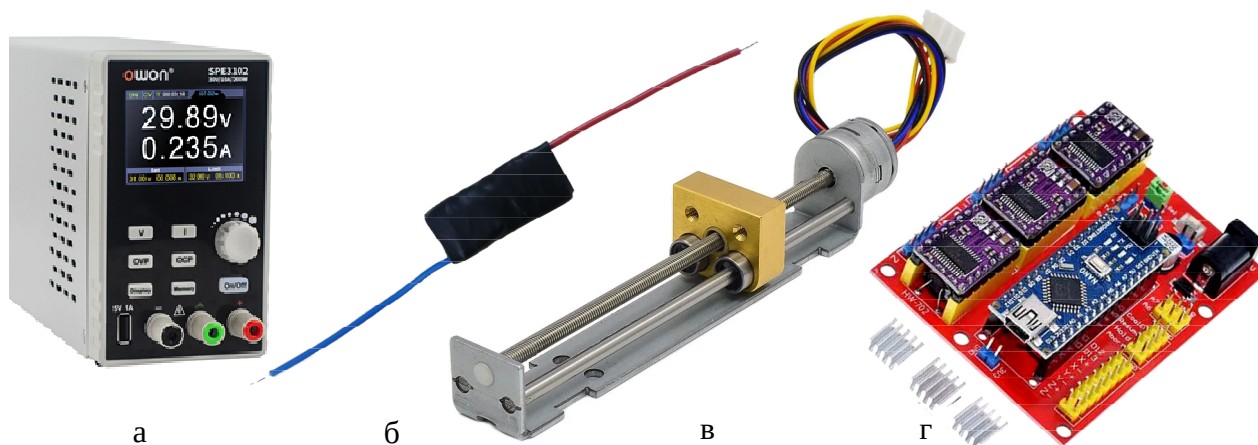


Рис. 2. Регулируемый источник постоянного тока (а), Одиночный индуктор комплекса «Релаксмаг» (б), Привод линейного перемещения с ШД «Модель С 80 mm Stroke» (в) и Оценочная плата «3D Magnetic 2Go» с 32-разрядным микроконтроллером Infineon XMC1100 и ядром ARM Cortex-M0 (г)

Оценочная плата с трехосевым датчиком МП крепится к каретке привода линейного перемещения X и сопрягается с ПК непосредственно через USB порт (рис. 3).

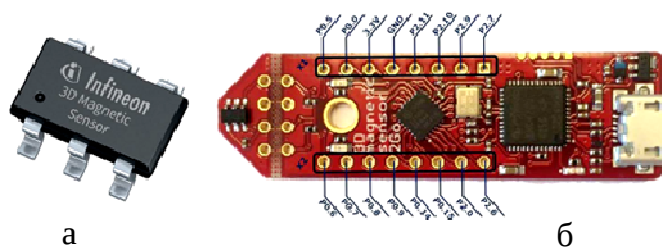


Рис. 3. Трехосевой датчик МП – TLV493D-A1B6 (а) и Оценочная плата «3D Magnetic 2Go» с 32-разрядным микроконтроллером Infineon XMC1100 и ядром ARM Cortex-M0 (б)

Датчик TLV493D-A1B6 предназначен для высокоточных измерений составляющих МП по трем координатам X, Y, Z. Достоинством датчика является очень низкое энергопотребление от 7 нА до 3,7 мА, которое зависит от пяти выбираемых режимов потребления мощности, а также быстрый двухсторонний обмен с микроконтроллером через цифровой интерфейс I²S и широкий диапазон измерения магнитной индукции до 150 мТл. Датчик выдает измеренные значения с разрешением 12-бит по каждой из координат и имеет высокую чувствительность, равную 0,098 мТл на бит. Допустимое напряжение питания лежит в пределах от 2,7 В до 3,5 В, а температурный диапазон составляет $-40 \div +125$ °С.

На данном этапе разработана и успешно апробирована программа ВП перемещения датчика МП и индуктора, интерфейс которой представлен на рисунке 4. С помощью этой

программы можно задавать диапазоны перемещения датчика и индуктора до максимального значения, равного 80 мм, а также шаги перемещения с минимальным значением 0,015625 мм (0,5 мм / 32).

В перспективе планируется разработать трехкоординатную систему сканирования МП одиночной ячейки-модуля, содержащей 4 независимо управляемых по току индуктора, для контроля и нормирования параметров всех 48 ячеек-модулей (рис. 5) полеформирующей системы комплекса «Релаксмаг» [2], с использованием третьего привода линейного перемещения по оси Z и драйвера ШД.

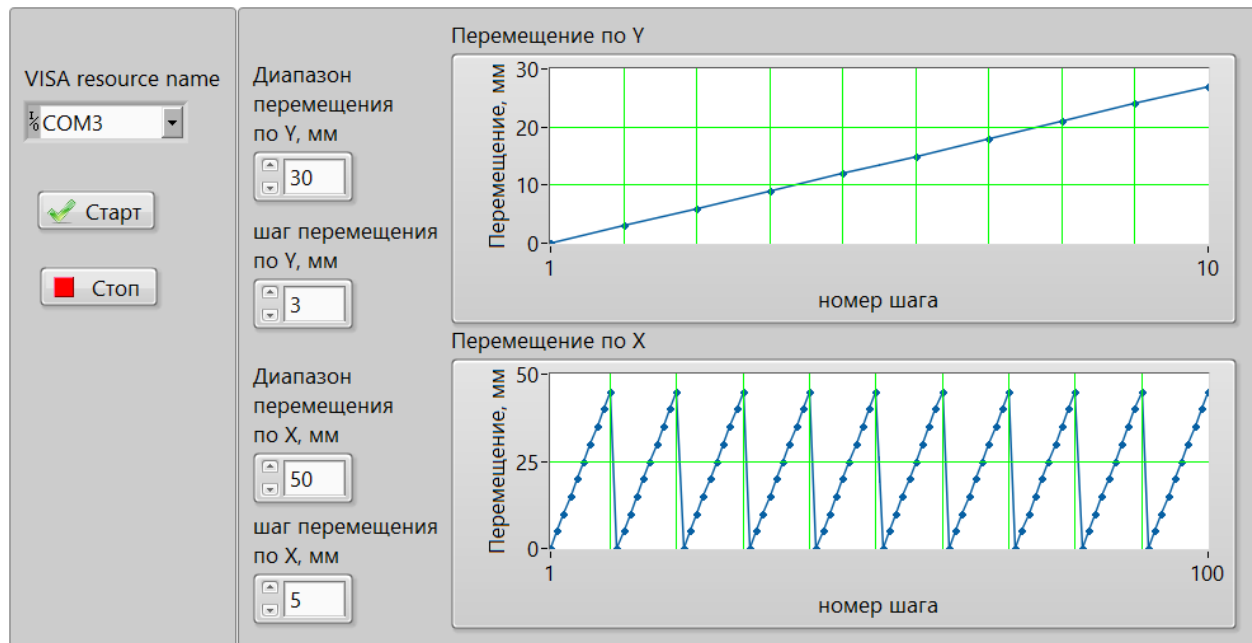


Рис. 4. Интерфейс передней панели программы ВП перемещения датчика МП и индуктора

Таким образом, предложена, разработана и частично реализована портативная автоматизированная система сканирования и измерения распределения МП одиночного индуктора комплекса общей магнитотерапии с высокими метрологическими характеристиками и высоким уровнем автоматизации, которая позволит повысить точность контроля параметров индукторов и ускорить процесс оптимизации их магнитных, электрических и массогабаритных характеристик при изготовлении и серийном производстве.

Библиографический список

1. Комплексная магнитотерапия: методы и технические средства. Монография / под ред. А.Г. Борисова и С.Г. Гуржина. – М: Радиотехника, 2010. – 2000 с. (Научная серия «Системы комплексной хрономагнитотерапии», редактор серии В.И. Жулев).
2. Гуржин С.Г. Направления и методы повышения эффективности медицинской технологии комплексной хрономагнитотерапии общего воздействия // Биомедицинская радиоэлектроника, 2025. Т. 28. № 4. С. 6-17.
3. Шаговый двигатель 20 мм, 12 В, В Stroke 55 мм / URL: <https://market.yandex.ru/card/shagovyy-dvigatel-20-mm-12v-b-stroke-55mm/103796548056?> (Дата обращения 20.01.2026 г.).
4. Тогулов А.С. Автоматизированная система измерения и визуализации магнитного поля ячейки магнитотерапевтического комплекса «Релаксмаг»// Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2025: сб. тр. XXXVIII Всерос. науч.-техн. конф. студ., мол. ученых и спец. / под общ. ред. В.И. Жулева. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2025. С. 335-339.
5. Infineon анонсировала высокоточный 3D магнитный датчик для бытовых и промышленных приложений / URL: <https://www.rlocman.ru/news/new.html?di=160038&ysclid=mlxhutbfny988263194> (Дата обращения 27.01.2026 г.).

6. 3D магнитный датчик. Комплект для оценки. Руководство пользователя / URL: <https://static.chipdip.ru/lib/266/DOC047266377.pdf> (Дата обращения 28.01.2026 г.).
7. Инструкция по эксплуатации. Одноканальный источник постоянного тока / URL: <https://static.chipdip.ru/lib/951/DOC023951290.pdf> (Дата обращения 28.01.2026 г.).
8. Плата расширения CNC Shield V4 для Arduino Nano / URL: <https://robot-kit.ru/3349/> (Дата обращения 27.01.2026 г.).
9. Драйвер шагового двигателя DRV8825 для RAMPS 1.4 / URL: <https://robot-kit.ru/3183/> (Дата обращения 27.01.2026 г.).
10. Плата Arduino Nano v3.0 / URL: <https://robot-kit.ru/article/Arduino-Nano-v3/> (Дата обращения 27.01.2026 г.).

УДК 621.317.421.2; ГРНТИ 59.29.35

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИНДУКТОРОВ МАГНИТОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «РЕЛАКСМАГ»

А.С. Тогулов, С.Г. Гуржин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, togulov.a.s@rsreu.ru*

Аннотация. В работе рассматривается тематика медицинских магнитоизлучающих модулей и систем, способных автоматизированно выполнить диагностику корректности их магнитоизлучающей способности. Приводятся схемы подобной системы, её особенности и недостатки. Демонстрируется сравнительный анализ с качественным ручным измерением магнитных полей. Выявляются достоинства предлагаемой идеи и дальнейшие шаги её развития.

Ключевые слова: измерительная система, магнитные поля, автоматизация измерений, скорость выполнения измерений, погрешность, позиционирование.

AUTOMATION OF MEASURING THE MAGNETIC FIELD OF INDUCTORS MAGNETOTHERAPEUTIC COMPLEX "RELAXMAG"

A.S. Togulov, S.G. Gurzhin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, togulov.a.s@rsreu.ru*

Abstract. The paper discusses the topic of medical magneto-emitting modules and systems that can automatically diagnose the correctness of their magneto-emitting ability. It provides diagrams of such a system, its features, and disadvantages. A comparative analysis with high-quality manual measurement of magnetic fields is demonstrated. The advantages of the proposed idea and further steps for its development are identified.

Keywords: measurement system, magnetic fields, automation of measurements, measurement speed, error, and positioning.

Известно, что существует отечественная аппаратно-программная магнитотерапевтическая система «Мультимаг», предназначенная для проведения комплексного лечения динамически изменяющимися в пространстве магнитными полями. Данная система обладает доказанным положительным воздействием на организм человека, точно дозируя слабые магнитные поля в конкретных локальных точках, учитывая физиологические особенности конкретного человека, что говорит о востребованности данной системы в её продвижении и изучении.

Так, в 2020 году была представлена её усовершенствованная версия – «Релаксмаг», эксплуатируемая в лечебно-профилактических учреждениях России, Казахстана и других стран. Подобные комплексы как правило используют всякого рода магнитоизлучающие модули. Число подобных излучающих ячеек может быть достаточно весомым для понимания полной получаемой картины, поскольку каждый такой модуль способен динамически формировать в своей локальной области магнитное поле различной конфигурации [1]. Тогда,

рассматривая данный магнитотерапевтический комплекс, необходимо указать схему расположения ячеек и индукторов в ней, как показано на рисунке 1.

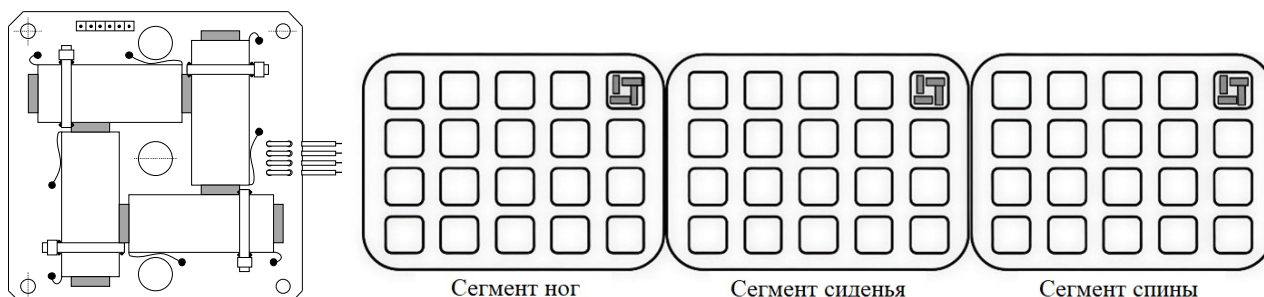


Рис. 1. Магнитоизлучающая ячейка (слева) и её схема расположения (справа) в комплексе «Релаксмаг»

Проверка корректности выдаваемых в пространстве ячейки магнитных полей занимает чрезвычайно много времени, выполняя её преимущественно ручным способом, что замедляет рабочий процесс. Установлено, что на текущее время в России нет общедоступных автоматизированных средств для быстрого и корректного измерения магнитных полей различного рода магнитоизлучателей с возможностью графического представления их распределения с допустимой метрологической погрешностью.

Изучение этой проблемы важно для развития теоретической базы в области приборостроения, распространяя более современные методы проведения автоматизированных измерений. Практическая значимость же заключается в применении выводов исследования для оптимизации рабочих процессов, позволяя сильно сократить рабочее время на проведение измерений. Таким образом, актуальность обусловлена ростом интереса к тематике медицинских магнитоизлучающих систем комплексной магнитотерапии в последние годы.

Существующие подходы в измерении магнитных полей носят количественный характер, акцентируя внимание на ручном способе фиксации измерителя или объекта измерения. Однако, они почти не учитывают зависимость затраченного времени от требуемой дискретизации измерений. Таким образом, вопрос состоит в том, как именно следует проводить измерения для оптимизации рабочего времени. Данная статья направлена на решение данной проблемы путём представления в первом приближении подобной системы с теоретической и практической обоснованностью.

Многообразная структура ячейки аппаратов комплексной магнитотерапии свидетельствует о наличии нетривиального распределения вокруг неё магнитных полей, что в свою очередь необходимо качественно охарактеризовать. В данном случае дискретный набор измеряемых значений индукции даёт представление о динамике распространения магнитного поля и его точности формирования. Подобные измерения однозначно связаны с методикой их проведения, погрешность которой напрямую зависит от способа её реализации.

Рассматривая поставленную проблему на начальном этапе, предлагается система, изображённая на рисунке 2, позволяющая оценить поля, распространяемые одной такой ячейкой.

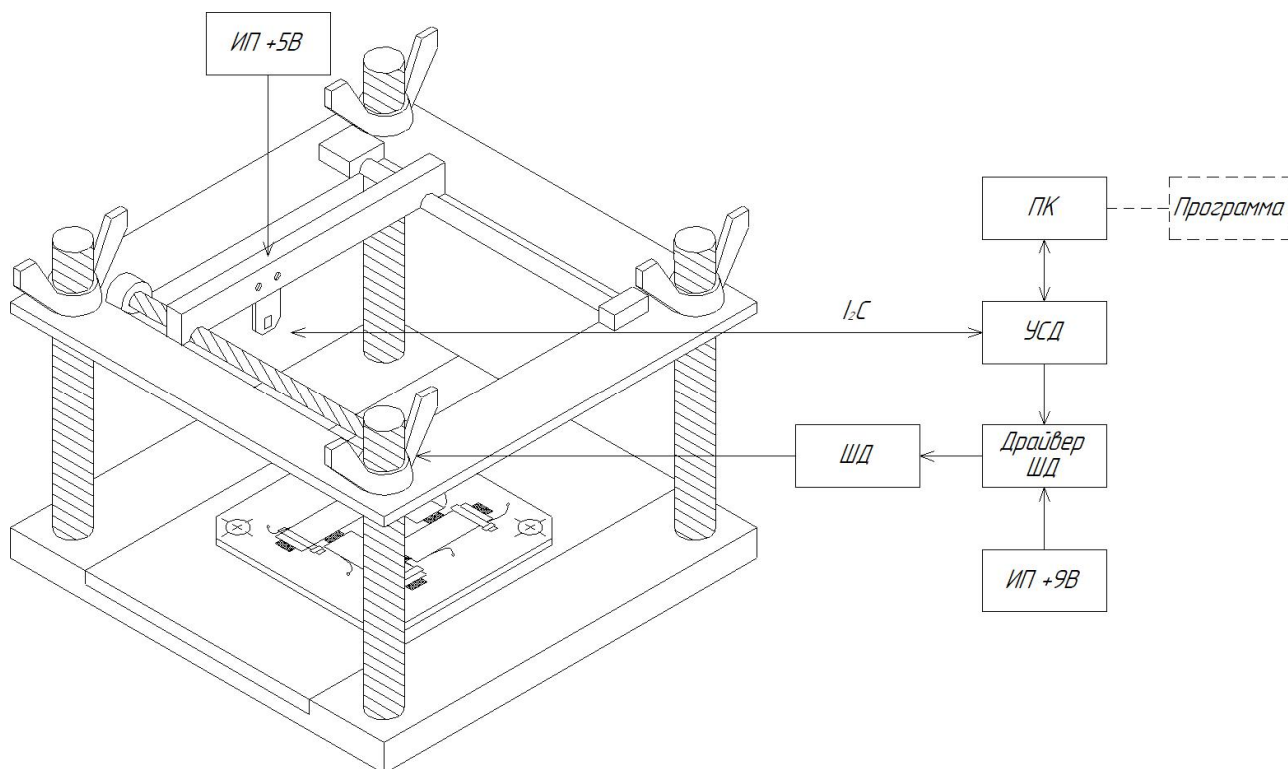


Рис. 2. Структурная схема измерительной установки

Установка автоматизированно с определённой точностью позволяет измерять магнитные поля, используя для этого принцип линейного перемещения измерительного модуля относительно самой магнитоизлучающей ячейки вдоль оси Ox . Дальнейшее управление данной ячейкой выполняются посредством ручного корректирования соответствующих механизмов. Данный подход был выбран из соображений реализуемости, поскольку начальный этап не требует предоставления готового решения.

В состав системы входят следующие структурные элементы:

- преобразователь вращательного движения мотора в прямолинейное перемещение исполнительного элемента, состоящее из шагового двигателя (ШД), червячного вала и самой каретки;
- датчик магнитного поля (например, трёхосевой магниточувствительный преобразователь на эффекте Холла - TLV493D наилучшим образом подходящий под нашу задачу) [2];
- устройство сбора данных (УСД) с возможностью реализации эффективного двухпроводного интерфейса передачи данных (I2C);
- источники питания (ИП) на +5В и +9В соответственно;
- каркас, собранный на основе винтового хода в двух осях плоскости рабочей зоны;
- программная реализация как алгоритма работы цифровой части схемы, так и программа, являющейся интерфейсом пользователя на персональном компьютере (ПК).

Основной принцип работы данной системы заключается в разработанной и внедрённой программным путём жёстко зафиксированной последовательности действий и программных предписаний, необходимых для считывания и обработки исходной информации, задания закона движения для дальнейшего управления измерительным модулем. Для данной задачи пользователю необходимо использовать соответствующие программы с уже разработанными интерфейсами, предназначенными для обмена информацией с устройствами через ПК. Примером такого интерфейса может служить рисунок 3, где изображён спроектирован-

ный интерфейс виртуального прибора считывающего информацию с датчика Холла по трём осям.

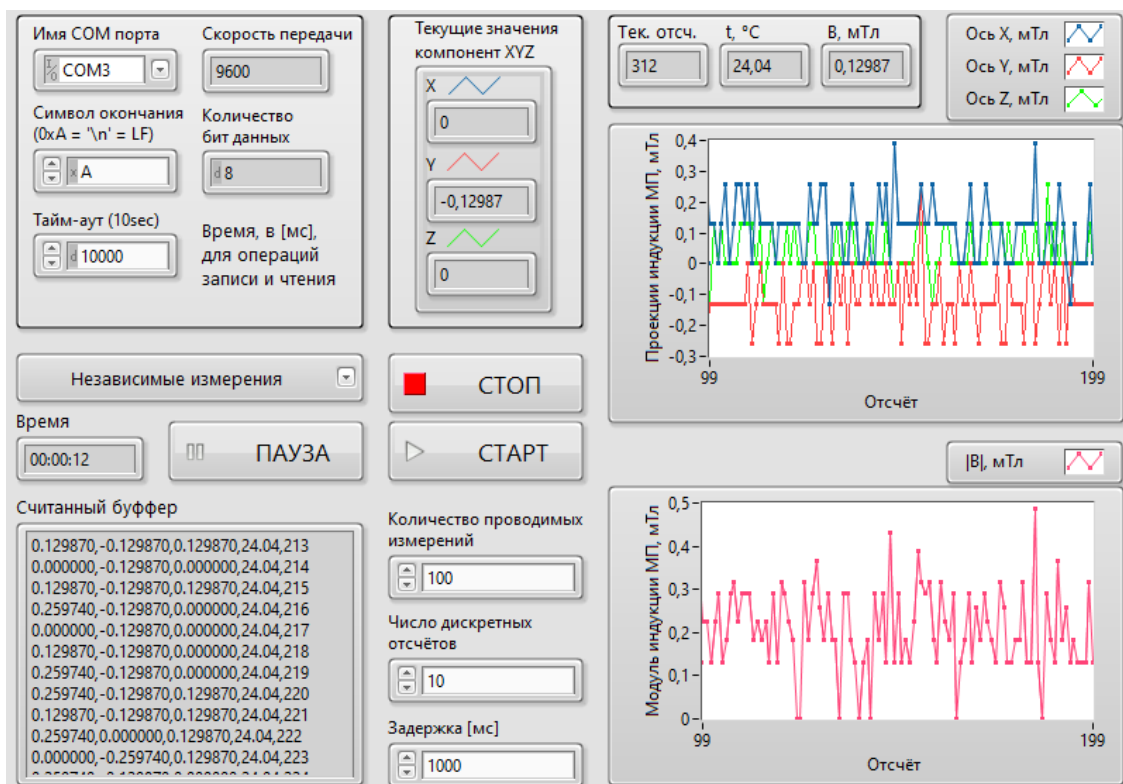


Рис. 3. Интерфейс программы считывания

Объект исследования, относительно которого строится данная система имеет следующие известные предельные характеристики:

- абсолютное максимальное значение магнитной индукции в каждом из индукторов по отдельности достигает 10 мТл;
- максимальная частота изменения магнитного поля в индукторе 100 Гц.

Данные параметры позволяют в первом приближении описать возможную аппаратную составляющую системы. Поскольку известно, что рабочая зона одного индуктора составляет примерно 50x20x20 (ШхДхВ), то достаточной шарико-винтовой парой можно считать любую пару класса С5 и выше с погрешностью хода 18 мкм и больше (на 300 мм). В качестве шагового двигателя предлагается использовать мини ШД позиционирования лазерной головки компьютерного CD-ROM (SPS-15RF0172FH) со следующими характеристиками:

- напряжение питания: 5 В;
- сопротивление на обмотку: 10 Ом;
- угол поворота на шаг: 18°;
- количество выводов: 4.

В качестве управляющего устройства для работы ШД следует использовать готовый модуль драйвера на базе интегральной микросхемы DRV8825 компании Texas Instruments исходя из соображений удобства и функциональной достаточности. Его основные технические характеристики:

- напряжение логики: 2,5...5,25 В;
- напряжение двигателей: 8,2...45 В;
- максимальный ток выхода: 2,5 А;
- шаговые режимы: 1/1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32.

Выбор режима шагового двигателя зависит от подаваемой комбинации тройки цифровых уровней на соответствующие выводы, гарантируя тем самым точность позиционирования датчика в пространстве рабочей области. Таким образом, наблюдается зависимость требуемых шагов ШД m от величины задаваемого шага $1 \leq [k] \leq 36$, напрямую влияющую на точность. Зная значение угла поворота ротора, используемого ШД, при 1 полном шаге, можно сказать, что при полном обороте на 360° он совершит 20 полных шагов, а зная, что один оборот ротора двигает каретку на 2 мм вдоль оси линейного перемещения, то можно сделать вывод, что 1 полный шаг соответствует 0,1 мм. Тогда, согласно формуле (1), данная величина будет зависеть от значения амплитуды перемещения текущего отсчёта y_i и целой части действительного числа $[k]$ [3].

$$m = \frac{|y_{i+1} - y_i|}{0,1 \text{ мм}} k \quad (1)$$

Если предложенная автоматизированная система удовлетворяет метрологической точности и достоверности выдаваемых результатов, то её влияние на время выполнения рабочих процессов измерения предельно точно должно превысить ручной способ измерения, поскольку известно, что любая выверенная система, выполняя поставленные процессы автоматически и как правило с высокой точностью позиционирования, может быть сконфигурирована на их выполнение с большей скоростью.

Для подтверждения данной гипотезы установкой были выполнены измерения магнитной индукции вдоль оси Ox для различного тока питания рабочей области одного индуктора, результаты чего записаны в таблице 1. Согласно формуле (2) и проведённому анализу допустимая относительная погрешность измерения в среднем составляет 3...10% в зависимости от малости величины поля.

$$\delta = \pm \left[2,0 + 0,1 \left(\frac{20 \text{ мТл}}{B_{\text{изм}}} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

Таблица 1. Значения проекции магнитной индукции в плоскости Oxy относительно одного индуктора.

Проекция магнитной индукции на ось Ox , мТл												
Ток, А	Ось Ox , мм											Ось Oy , мм
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
0,1	0,27	0,19	-0,15	-0,73	-0,97	-0,99	-0,84	-0,58	-0,09	0,31	0,33	0
	0,05	0,00	-0,16	-0,32	-0,52	-0,58	-0,55	-0,43	-0,22	-0,08	0,05	4
	-0,06	-0,13	-0,22	-0,30	-0,36	-0,39	-0,36	-0,28	-0,17	-0,09	-0,02	8
	-0,07	-0,11	-0,16	-0,21	-0,25	-0,27	-0,27	-0,22	-0,17	-0,13	-0,09	12
	-0,09	-0,11	-0,14	-0,17	-0,19	-0,21	-0,21	-0,19	-0,16	-0,13	-0,10	16
0,3	0,93	0,67	-0,47	-1,81	-2,49	-2,71	-2,48	-1,80	-0,63	0,84	1,26	0
	0,32	0,09	-0,44	-1,03	-1,45	-1,56	-1,44	-0,98	-0,46	0,21	0,43	4
	0,03	-0,15	-0,38	-0,65	-0,84	-0,94	-0,89	-0,70	-0,40	-0,08	0,10	8
	-0,08	-0,22	-0,36	-0,52	-0,60	-0,60	-0,54	-0,40	-0,27	-0,10	-0,01	12
	-0,10	-0,17	-0,24	-0,31	-0,40	-0,44	-0,43	-0,39	-0,31	-0,24	-0,13	16
0,5	1,58	1,51	-0,18	-2,20	-4,06	-4,55	-4,08	-2,93	-0,98	1,36	2,25	0
	0,65	0,22	-0,62	-1,80	-2,39	-2,58	-2,31	-1,54	-0,53	0,25	0,84	4
	0,02	-0,38	-0,77	-1,12	-1,46	-1,52	-1,29	-0,88	-0,31	0,07	0,33	8
	-0,19	-0,35	-0,62	-0,86	-1,03	-1,11	-1,04	-0,87	-0,63	-0,36	-0,15	12
	-0,31	-0,41	-0,51	-0,65	-0,74	-0,81	-0,79	-0,67	-0,54	-0,37	-0,24	16

По результатам измерения в среде графического программирования LabVIEW было сформировано изображение среза магнитного поля в рабочей области одного индуктора – рисунок 4, а для плавности изображения был реализован механизм размытия.

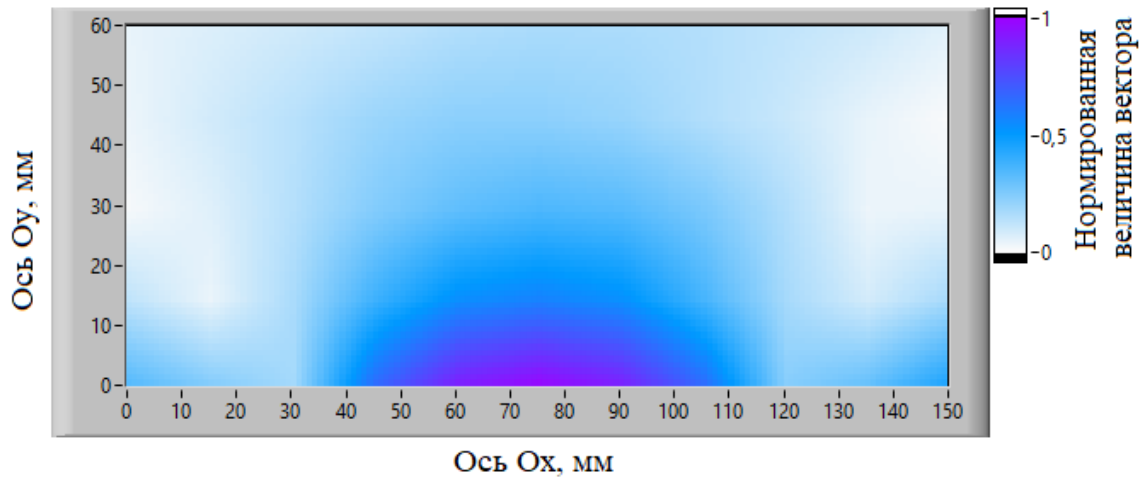


Рис. 4. Распределение магнитного поля в плоскости Oxy

Сам алгоритм довольно прост, принимая на вход лишь массив исходного среза, коэффициент нормирования и размытия. Вся реализация построена на выполнении рекуррентной формулы из уравнения (3), в которой под заглавными буквами греческого алфавита подразумеваются углы исходного массива за вычетом последней строки и столбца. Как результат, формула работает корректно.

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(1 - \frac{k-t_2}{k}\right) \left[C \frac{k-t_1}{k} + D \left(1 - \frac{k-t_1}{k}\right) \right] + \frac{k-t_2}{k} \left[A \frac{k-t_1}{k} + B \left(1 - \frac{k-t_1}{k}\right) \right]; \\ t_1 = \text{mod}\left(\frac{x}{k}\right), t_2 = \text{mod}\left(\frac{y}{k}\right). \end{array} \right. \quad (3)$$

Из проделанной работы следует вывод, что поставленная гипотеза верна, означая при этом что разработанная на начальном этапе система работает эффективно и корректно.

Библиографический список

1. Каплан М.Б. Представление многоэлементной полеформирующей системы магнитотерапевтического аппарата // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2025 [текст]: сб. тр. VIII междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.6./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. - Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2025. - С. 244-248.
2. Гуржин С.Г., Шуляков А.В. Особенности применения и погрешности оптических датчиков, используемых в комплексной хрономагнитотерапии // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2025 [текст]: сб. тр. VIII междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.6./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. - Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2025. - С. 262-269.
3. Тогулов А.С., Гуржин С.Г. Автоматизированная система измерения и визуализации магнитного поля ячейки магнитотерапевтического комплекса «Релаксмаг» // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2025 [текст]: сб. тр. XXXVIII Всерос. науч.-техн. конф. студ., мол. учёных и спец., 3-5 декабря 2025 г. / под общ. ред. В.И. Жулева.. - Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2025. - С. 335-339.

УДК 621.365

СИСТЕМА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ МЕДИЦИНСКИХ ОДЕЯЛ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕЛА ПАЦИЕНТА

А.А. Тимофеева, С.В. Смирнова, А.Н. Благовещенский

Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А.Н. Туполева - КАИ (КНИТУ-КАИ),

Российская федерация, Казань, anstt2510@gmail.com

Аннотация. Температура, выступая одним из показателей гомеостаза, является важным параметром, который требуется контролировать, особенно в операционный и послеоперационный периоды. Одним из способов поддержания нормотермии во время проведения хирургических вмешательств является принудительный конвекционный обогрев. В данной работе будут представлены исследования и начальная разработка информационно-измерительной системы контроля параметров медицинского одеяла.

Ключевые слова: температура, осложнения, обогрев, система, медицинское одеяло.

INDUSTRIAL CONTROL SYSTEM OF PARAMETERS OF MEDICAL BLANKETS INTENDED FOR MAINTAINING PATIENT'S BODY TEMPERATURE

A. A. Timofeeva, S.V. Smirnova, A.N. Blagoveshchensky

Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev - KAI (KNRTU-KAI),

Russia, Kazan, anstt2510@gmail.com

Abstract. Temperature, acting as one of the indicators of homeostasis, is an important parameter that needs to be controlled, especially during the operating and postoperative periods. One of the ways to maintain normothermia during surgical interventions is forced convection heating. This paper will present research and initial development of an information and measuring system for monitoring the parameters of a medical blanket.

Keywords: temperature, complications, heating, system, medical blanket.

Температура является важным параметром, определяющим состояние человека. Выступая одним из показателей гомеостаза, её значения, находящиеся за определёнными границами, свидетельствуют о нарушении многих химических и физиологических процессов [1]. Поддержание стабильной температуры внутренней среды позволяет организму человека, как гомойотермного существа, сохранять активность и приспосабливаться к меняющимся условиям окружающей среды. Нормальная температура тела человека колеблется в зависимости от измеряемой зоны и зависит от пола, возраста и факторов окружающей среды. Тем не менее можно выделить некоторый диапазон значений - от 35,5°C до 37,2°C, выход за пределы которого свидетельствует о возникновении гипотермии или гипертермии [2].

Поддержание температуры тела особенно важно в операционный и послеоперационный периоды, при проведении общей анестезии, особенно продолжительностью более 30 минут. Перераспределение тепла между центральными и периферическими отделами тела является одной из главных причин появления гипотермии у пациентов, среди осложнений которой: замедленный выход из наркоза, дрожь, нагноение раны, коагулопатия, сердечно-сосудистые осложнения. На основании исследований, проведённых в разных странах, можно сделать вывод, что непреднамеренная пери- и интраоперационная гипотермия встречается довольно часто, примерно в 11-89% случаев [3,4]. Пассивная интраоперационная гипертермия возникает вследствие перегреваний, чаще всего встречается у младенцев и детей. Во избежание дальнейшего повышения температуры требуется прекратить согревание, избавиться от избыточной одежды. Как правило, механизмы защиты от перегрева в системах с форсированной конвекцией тёплого воздуха эффективны, поэтому ненамеренная гипертермия во время согревания пациента возникает нечасто [5].

Принудительный конвекционный воздушный обогрев представляет собой один из наиболее эффективных способов поддержания нормотермии во время проведения хирургических вмешательств и предотвращения различных возможных послеоперационных осложнений. Одними из медицинских принадлежностей, приобретших популярность и работающих таким образом, являются специализированные медицинские одеяла. Вследствие того, что непреднамеренная пери- и интраоперационная гипотермия встречается часто, а наличие гипотермии исключить нельзя, (злокачественная гипертермия не учитывается, так как является заболеванием и требует введения препарата Дантролен), реализация и исследование таких систем, особенно в нашей стране, важны и актуальны [6].

Рассматриваемые системы состоят из установки, нагревающей и нагнетающей воздух и одеяла. Для определения теплового потока, производимого установкой, используется формула:

$$Q = F\Delta T_{\text{ср}} \quad (1).$$

В данном случае Q - поток тепла [Вт], F - поток воздуха [м/с], ΔT - температурный коэффициент между соплом аппарата и окружающим воздухом [$^{\circ}\text{C}$], c - удельная теплоемкость воздуха [кДж/(кг К)], ρ - плотность воздуха у сопла при текущей температуре [кг/м³].

На основании исследований Anselm Bräuer следует, что качество теплообмена между одеялом с принудительным воздушным обогревом и используемом в качестве человека манекеном, является ключевым параметром эффективности таких систем. Для описания этого процесса используется уравнение:

$$Q = h\Delta T A \quad (2).$$

Здесь Q – тепловой поток [Вт], h – коэффициент теплообмена [Вт/м²· $^{\circ}\text{C}$], ΔT – температурный градиент между одеялом и поверхностью манекена [$^{\circ}\text{C}$], A – площадь поверхности, закрываемая одеялом [м²].

Через воздухопроницаемую контактную поверхность одеяла проходит воздух, который передаёт тепло посредством конвекции, а также передача тепла через кондукцию и радиацию, поэтому уравнение (2) также подходит для описания этого процесса обмена теплом.

Данное уравнение также показывает зависимость передачи тепла от трёх факторов: температурного градиента (производительность одеяла повышается при уменьшении разницы температур), коэффициента передачи тепла и площади покрытия тела конвекционным одеялом (чем больше закрытых участков, тем эффективнее передача тепла) [7].

При создании нового медицинского оборудования обязательно требуется иметь систему (или прибор), контролирующую его параметры. Особое внимание требуется уделить именно точности, так как разработка также может быть использована при проверке.

Система должна быть многоканальной, ввиду того, что температура в разных местах одеяла может различаться. Более того, многоканальность увеличивает точность, правильность измерений и позволяет выявить несовершенства и поломки. На данный момент в системе предусмотрено 11 каналов (22 датчика). Питание – батарейное, 15В. Ожидаемая частота $f \approx 500-1000$ Гц, чтобы обеспечить появление меньшего количества помех. Диапазон измерений: 35 $^{\circ}\text{C}$ - 41 $^{\circ}\text{C}$. Предположительно требуется 1 сек. служебного времени на проверку 1 пары датчиков, тогда на 11 пар датчиков требуется не более 30с. Из этого следует, что за, к примеру, 5 минут работы системы получится 10 полных циклов измерения. На рисунке 1 представлена структурная схема канала системы контроля параметров медицинского одеяла. Она включает в себя датчики температуры, блок модуль реле (коммутатор), инструментальный усилитель, преобразователь напряжение-частота, оптронную развязку, преобразователь частота-код, микроконтроллер, персональный компьютер.

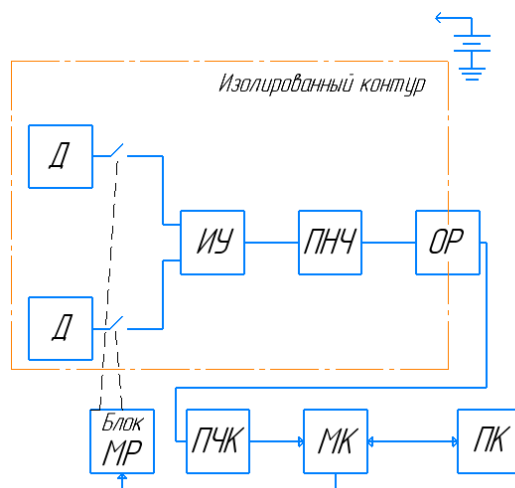


Рис. 1. Структурная схема канала, где: Д – датчики температуры, Блок МР – блок модуль реле, ИУ – инструментальный усилитель, ПНЧ – преобразователь напряжение-частота, ОР – оптронная развязка, ПЧК – преобразователь частота-код, МК – микроконтроллер, ПК – персональный компьютер

Микроконтроллер, имеющийся в разработке, управляет работой всей системы, обеспечивает взаимодействие с исполнительными устройствами и датчиками.

Ключевым элементом схемы является преобразователь напряжения в частоту, выполненный с использованием интегрального таймера КР1006ВИ1 (зарубежным аналогом является NE555), который является одной из наиболее широко применяемых простых аналого-цифровых схем. Микросхема дешёвая, схемы на её основе работают достаточно надёжно, в системе предусмотрено применение одной такой микросхемы. Благодаря преобразованию в частоту становится возможным использовать в схеме оптронное разделение, которое обезопасит систему. Более того, таймер КР1006ВИ1 интегрирующего типа, его особенности функционирования позволяют гальванически развязаться от цепей питания в одну линию, что весьма компактно, а также уменьшить погрешность (за 1 цикл измерения становится известно, какая будет разность температур, при наборе n -го количества импульсов, например, $n=100$, количество импульсов суммируется и получается результирующее значение, т.е. большая часть работы происходит на 1 элементе, что уменьшает погрешность).

На рисунке 2 представлена структурно-функциональная схема многоканального измерителя разности температур.

На рисунке 3 представлена упрощённая модель преобразователя разности температур в частоту, которая выполнена в программной среде Proteus. В качестве операционного усилителя используем КР140УД20А (зарубежный аналог - A747C). В данном случае потребуются корректировка.

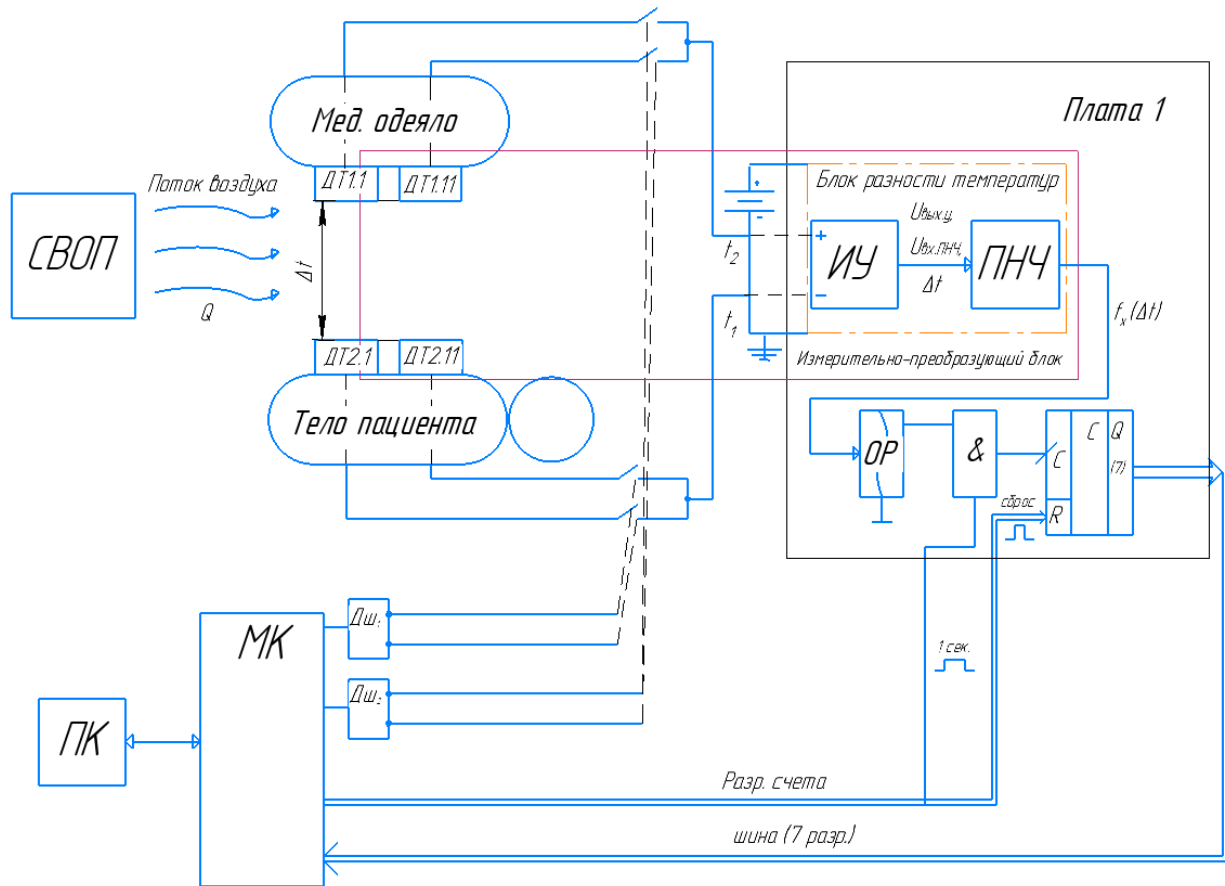


Рис. 2. Структурно-функциональная схема многоканального измерителя разности температур, где: СВОП - система воздушного обогрева пациента, ДТ - датчики температуры («1» - на одеяле, «2» - у тела пациента), ИУ - инструментальный усилитель, ПНЧ - преобразователь напряжение-частота, ОР - оптронная развязка, С7 - счётчик семиразрядный, МК - микроконтроллер (Arduino), Дш - дешифратор, ПК - персональный компьютер

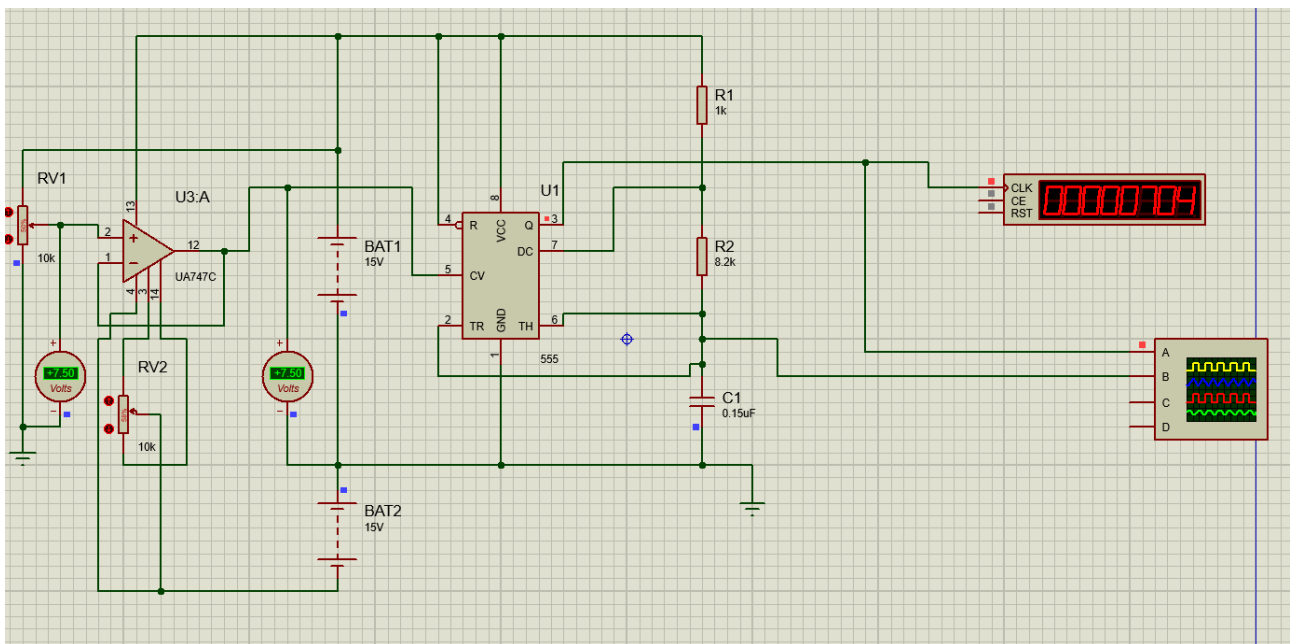


Рис. 3. Упрощённая модель преобразователя разности температур в частоту

В ходе моделирования получили осциллограммы, показанные на рисунке 4. Прямоугольные импульсы - это визуализация выходной частоты ПНЧ, сигналы треугольной формы индицируют процессы заряда и разряда конденсатора С1 времязадающей цепи.

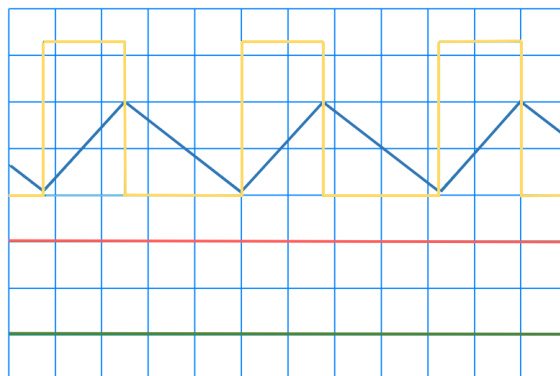


Рис. 4. Показания осциллографа

Используя двухполярное питание, собрали макет на беспаячной плате, показанный на рисунке 5.

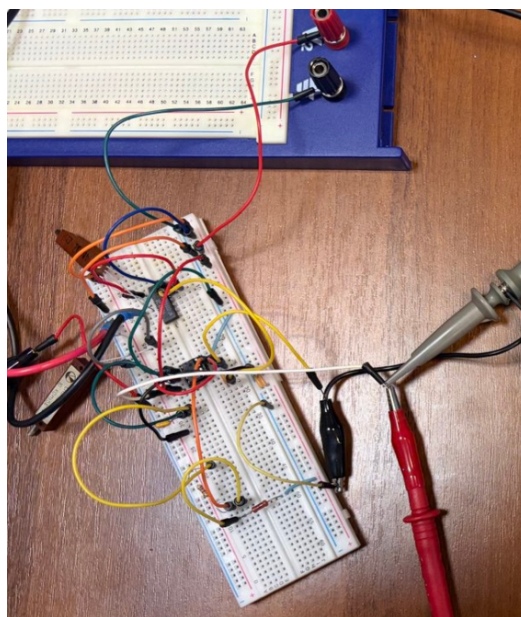


Рис. 5. Схема на беспаячной плате

Полученные в ходе измерений значения, представим в виде графиков, показанных на рисунке 6.

Относительная погрешность составляет $\delta = 2,6\%$, что позволяет сделать выводы о том, что схемотехническое моделирование в программной среде Proteus даёт возможность не только реализовать предполагаемые технические решения, но и значительно сократить сроки разработки [8].

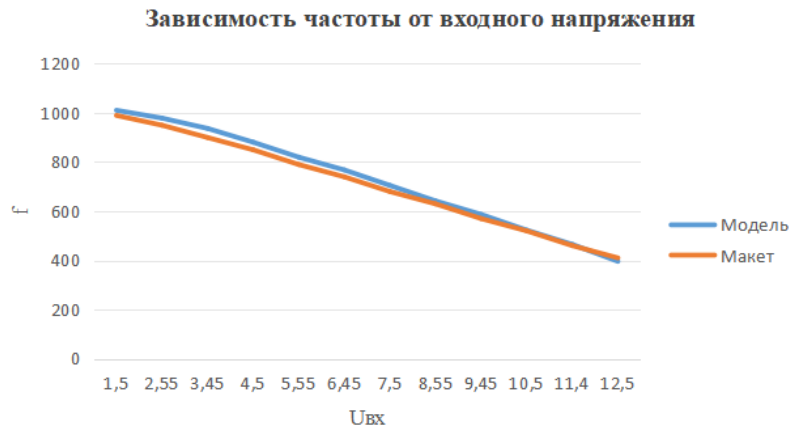


Рис. 6. Графики зависимости частоты от входного напряжения

Приведённые в данной статье исследования и дальнейшая работа, позволяют впоследствии реализовать информационно-измерительную систему контроля параметров медицинского одеяла, что может способствовать повышению инженерного потенциала и возможности укрепления рынка импортозамещения.

Библиографический список

1. Морозов В.Н., Субботина Т.И., Савин Е.И. Воздействие низких температур на организм: результаты исследований и профилактика осложнений (монография) // Международный журнал экспериментального образования. 2013. №9. с. 6-6; URL: <https://expeducation.ru/article/view?id=4152> (дата обращения: 19.02.2026).
2. Богданова Т.М., Бакуткин В.В., Большаков А.А., Бакуткин И.В., Мельников Л.Ф., Спиринов В.Ф., Наливаева А.В. Мониторинг кожной температуры тела человека и его применение в клинической практике // Международный журнал экспериментального образования. 2013. № 10-2. с. 242-245; URL: <https://expeducation.ru/article/view?id=4220> (дата обращения: 19.02.2026).
3. Su-Mei Wang, LI-Jian Pei, Yue-Lun Zhang, Jie Yi. Duration of Hypothermia is Associated with Postoperative Complications in Patients Undergoing Gynecological Surgery: A Prospective Cohort Study // Chinese Medical Sciences Journal. - 2024. - Vol. 39, №4. - p.233-240. - DOI: 10.24920/004419. URL: <https://cmsj.cams.cn/rc-pub/front/front-article/download/78388483/lowqualitypdf/Duration%20of%20Hypothermia%20is%20Associated%20with%20Postoperative%20Complications%20in%20Patients%20Undergoing%20Gynecological%20Surgery:%20A%20Prospective%20Cohort%20Study.pdf> (дата обращения: 22.02.2026).
4. Mingkwan Wongyingsinn, Varut Pookprayoon. Incidence and associated factors of perioperative hypothermia in adult patients at a university-based, tertiary care hospital in Thailand // BMC Anesthesiology. - 2023. URL: [https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10127435/#:~:text=Results,0.001\)%20than%20those%20without%20hypothermia](https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10127435/#:~:text=Results,0.001)%20than%20those%20without%20hypothermia) (дата обращения: 22.02.2026).
5. Патент RU 2463931 C1. Способ профилактики периперационной гипотермии и гипертермии при проведении операции под наркозом. Патентообладатели: Зинатуллин Радик Медфхатович, Катаев Антон Валерьевич.; опубликовано: 20.10.1012, бюл. №29. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2463931C1/ru> (дата обращения: 19.02.2026).
6. Тухватулина Р.Р. Матинян Н.В. Злокачественная гипертермия (обзор литературы) // Вестник анестезиологии и реаниматологии. - 2023 - т.20, №2. - с. 78-84. DOI: 10.24884/2078-5658-2022-20-2-78-84. URL: <https://www.vair-journal.com/jour/article/download/752/630> (дата обращения: 22.02.2026).
7. Anselm, B., Michael, J.M., Nicolas, S. et.al. Efficacy of forced-air warming systems with full body blankets. Can J Anesth 54, 34-41 (2007). URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03021897> (дата обращения: 20.02.2026).
8. Тимофеева А.А., Смирнова С.В., Благовещенский А.Н. Исследование интегрального таймера в составе генератора сигналов прямоугольной формы. Инженерная мысль: IV Республиканская научно-практическая конференция, 25 ноября 2025 г. / Под. ред. С.В. Смирновой: сборник докладов. - Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2025. - с. 262-266.

УДК 615.47:004.31; ГРНТИ 47.53

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДВОЙНОЙ МОДУЛЯЦИИ НА ОБРАБОТКУ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА НА ОСНОВЕ СЛОЖНЫХ ДИСКРЕТНЫХ ВЫБОРОК

Ю.А. Булгаков, А.А. Михеев

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, yura.bulgakov.00@gmail.com

Аннотация. В работе исследуется влияние эффекта двойной модуляции на процесс обработки электрокардиосигналов (ЭКС) методом сложных дискретных выборок (СДВ). Рассматривается классическая модель дискретизации как амплитудно-импульсной модуляции (АИМ) и анализируются причины возникновения частотной модуляции (ЧИМ) в реальных ЭКС вследствие вариабельности сердечного ритма. Описан механизм трансформации спектра сигнала при наличии двойной модуляции (АИМ+ЧИМ) и показано, что боковые составляющие от ЧИМ снижают эффективность подавления высших спектральных зон алгоритмами СДВ. Приводятся результаты имитационного моделирования, демонстрирующие рост среднеквадратичного отклонения (СКО) при восстановлении сигнала. Проведено сравнение эффективности подавления выбранной спектральной зоны классическим методом СДВ и модифицированным методом с подбором сдвигов дополнительных выборок. Обосновывается необходимость разработки новых алгоритмов, компенсирующих частотную вариабельность циклов сердечных сокращений.

Ключевые слова: электрокардиосигнал, сложные дискретные выборки, двойная модуляция, частотная модуляция, амплитудно-импульсная модуляция, дрейф изолинии, спектральный анализ.

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF DOUBLE MODULATION ON THE PROCESSING OF ELECTROCARDIO SIGNALS BASED ON COMPLEX DISCRETE SAMPLES

Yu.A. Bulgakov, A.A. Mikheev

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, yura.bulgakov.00@gmail.com

The summary. This paper investigates the influence of the dual modulation effect on the processing of electrocardiogram (ECG) signals using the method of complex discrete samples (CDS). The classical discretization model as amplitude-pulse modulation (AIM) is considered, and the causes of frequency modulation (FM) in real ECG signals due to heart rate variability are analyzed. The mechanism of signal spectrum transformation in the presence of dual modulation (AIM+FM) is described, demonstrating that sidebands from frequency modulation reduce the efficiency of suppressing higher spectral zones by CDS algorithms. Results of simulation modeling are presented, showing an increase in the root mean square error (RMSE) during signal reconstruction. A comparison is made between the suppression efficiency of a selected spectral zone using the classical CDS method and a modified method with the selection of additional sample shifts. The necessity of developing new algorithms compensating for the frequency variability of cardiac cycle intervals is substantiated.

Keywords: electrocardiogram signal, complex discrete samples, dual modulation, frequency modulation, amplitude-pulse modulation, baseline wander, spectral analysis.

Современные методы цифровой обработки биомедицинских сигналов предъявляют высокие требования к точности восстановления аналоговой формы сигнала по его дискретным отсчетам [1]. Одним из перспективных направлений является использование алгоритмов сложных дискретных выборок (СДВ) для устранения дрейфа изолинии из смеси электрокардиосигнала с дрейфом. Представление дискретных выборок сложными дискретными выборками дает возможность либо смягчить требования к фильтру нижних частот (ФНЧ) на этапе восстановления, либо расширить эффективный частотный диапазон регистрируемых процессов без увеличения частоты дискретизации [2]. Из-за наличия в обрабатываемом сигнале по-

мимо амплитудно-импульсной модуляции, модуляции по частоте, на восстановление выделяемого сигнала начинают влиять спектральные составляющие от частотной модуляции.

Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное исследование влияния эффекта двойной модуляции на процесс обработки ЭКС с помощью СДВ.

Сложные дискретные выборки при амплитудно-импульсной модуляции

Классическая модель дискретизации непрерывного сигнала $x(t)$ может быть представлена как амплитудно-импульсная модуляция (АИМ). В этом случае сигнал представляется в виде последовательности коротких импульсов, амплитуда которых равна значению исходного сигнала в моменты дискретизации. Математически процесс идеальной дискретизации описывается умножением исходного сигнала на периодическую последовательность дельта-функций:

$$x_{АИМ}(t) = x(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT),$$

где $T = 1/f_d$ — период дискретизации, f_d — частота дискретизации.

Спектр такого сигнала $X_{АИМ}(f)$ представляет собой бесконечную сумму копий спектра исходного сигнала $X(f)$, сдвинутых на частоты, кратные частоте дискретизации:

$$X_{АИМ}(f) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(f - kf_d),$$

где k - номер спектральной зоны.

Фрагмент спектра амплитуд АИМ-сигнала с нулевой и первой спектральными зонами показан на рисунке 1.

Для восстановления сигнала $x(t)$ из $x_{АИМ}(t)$ необходимо выделить основную (нулевую) спектральную зону ($k=0$) с помощью фильтра нижних частот с частотой среза $f_c \geq f_{\max}$ (где f_{\max} - максимальная частота в спектре сигнала) и подавить все высшие зоны ($|k| \geq 1$).

Метод СДВ позволяет улучшить подавление высших спектральных зон еще до этапа аналоговой фильтрации. Как показано на рисунке 2, в результате обработки сигнала с АИМ, в спектре полученной последовательности импульсов полностью подавлена первая спектральная зона.

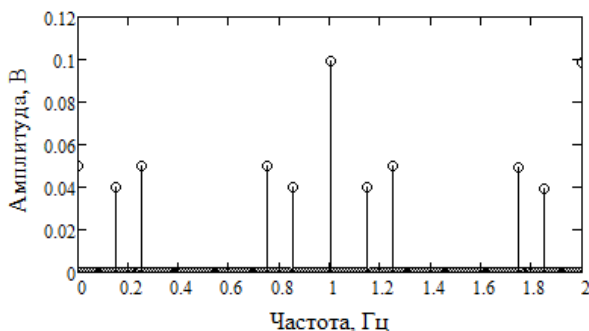


Рис. 1. Спектр сигнала с АИМ

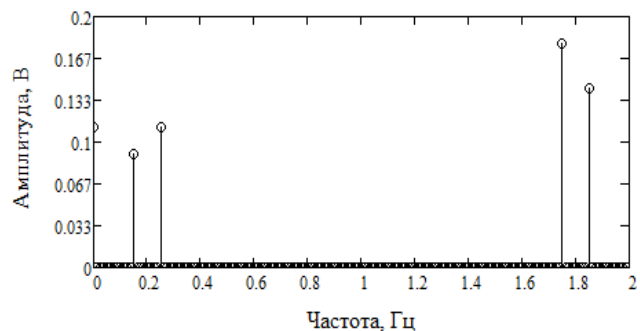


Рис. 2. Спектр последовательности СДВ сигнала с АИМ

Влияние частотной модуляции на спектр дискретизированного сигнала

Электрокардиосигнал, в отличие от модельного, не является строго периодическим. Вариабельность сердечного ритма приводит к тому, что интервалы между последовательными

ми кардиокомплексами изменяются во времени. Это означает, что помимо амплитудной модуляции, сигнал несет в себе частотную модуляцию.

Представим упрощенную модель ЭКС как последовательность импульсов, следующих с непостоянным периодом. Мгновенная частота следования $f_i(t)$ изменяется вокруг среднего значения f_0 :

$$f_i(t) = f_0 + \Delta f \sin(2\pi f_m t),$$

где Δf - девиация частоты, а f_m - частота модуляции.

Частотная модуляция порождает бесконечное число боковых составляющих в спектре несущей (которой в нашем случае является частота дискретизации или частота следования кардиокомплексов). Для тональной частотной модуляции спектр колебания описывается функциями Бесселя первого рода $J_n(m)$ где $m = \Delta f / f_m$ - индекс частотной модуляции [3].

Применительно к задаче выделения дрейфа изолинии, эффект ЧИМ приводит к тому, что вокруг каждой спектральной компоненты, соответствующей k -й зоне дискретизации, появляются дополнительные боковые полосы на частотах $kf_a \pm nf_m$ (рисунок 3). Мощность этих боковых составляющих размывает спектр и проникает в те частотные области, которые алгоритм СДВ должен был подавить. Чем выше индекс частотной модуляции m , тем больше таких боковых составляющих и тем больше их энергия.

Таким образом, если на вход алгоритма обработки подается АИМ-сигнал, промодулированный дополнительно по частоте, то классический способ формирования СДВ оказывается неэффективным при подавлении спектральных зон с широким спектром боковых составляющих ЧИМ. В спектре обработанной зоны фиксируется наличие не подавленных спектральных компонент (рисунок 4).

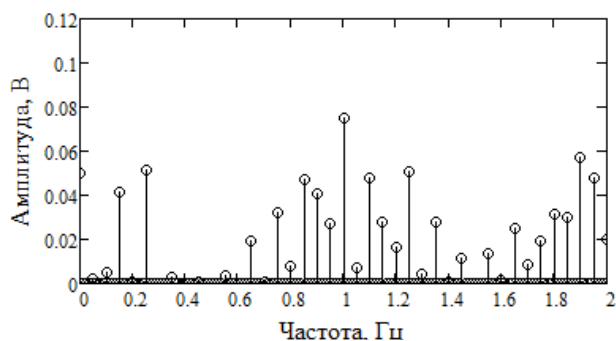


Рис. 3. Спектр сигнала с двойной модуляцией

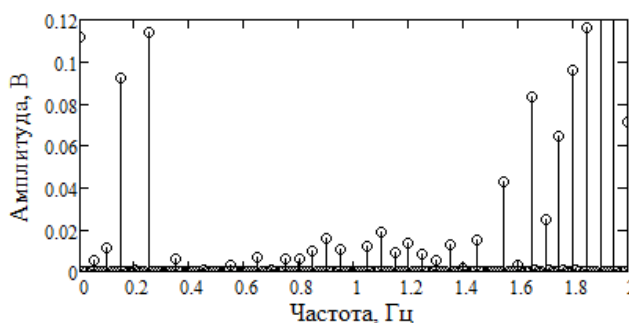


Рис. 4. Спектр последовательности СДВ сигнала с двойной модуляцией

Оценка влияния двойной модуляции

Наличие дополнительных спектральных компонент, вызванных ЧИМ, приводит к тому, что при обработке ЭКС методами СДВ подавление помех происходит не полностью. Остаточные составляющие, попадая в полосу пропускания восстанавливающего фильтра, искажают форму сигнала. Это приводит к росту погрешности восстановления.

Для количественной оценки этого эффекта было проведено имитационное моделирование. Тестовый сигнал представлял собой последовательность двух синусоид. Частоты первой и второй соответственно равны 0,15 и 0,25 Гц. Относительное изменение периода опроса 0,1. Среднее значение периода опроса 1с, изменение периода происходит по синусоидальному закону с частотой 0.1 Гц. В качестве ФНЧ применялось окно Кайзера с частотой среза 0,7 Гц.

На рисунке 5 показан процесс выделения нулевой спектральной зоны в сравниваемых последовательностях СДВ. В сравнении участвовали классические СДВ без изменения частоты дискретизации (рисунок 5, а), СДВ с переменной частотой дискретизации (рисунок 5, б) и СДВ с подбором сдвигов дополнительных выборок [4] (рисунок 5, в).

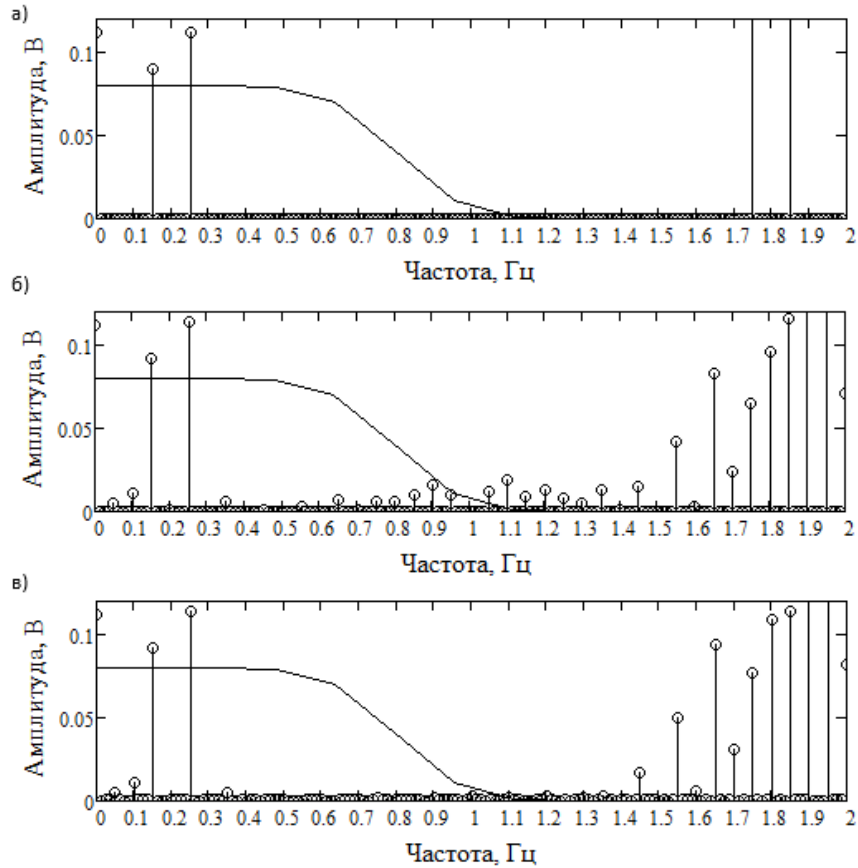


Рис. 5. Выделение информационных составляющих СДВ с помощью ФНЧ

Критерием оценки выступало среднеквадратичное отклонение (СКО) между восстановленным сигналом и тестовым сигналом без шума и искажений. СКО рассчитывалось по формуле:

$$СКО = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{исх}(i) - x_{восст}(i))^2},$$

где N - количество отсчетов в сравниваемых сигналах.

Таблица 1. Сравнение среднеквадратичных отклонений (СКО) для различных типов модуляции при восстановлении сигнала.

Метод обработки	Тип модуляции	СКО, (усл. ед.)
Классические СДВ	АИМ	0,031
Классические СДВ	АИМ+ЧИМ	0,128
СДВ с подбором сдвигов дополнительных выборок	АИМ+ЧИМ	0,1

Значительное увеличение СКО в третьем случае по сравнению с первым объясняется тем, что даже при полностью подавленной первой спектральной зоне (рисунок 5, в) в нулевой спектральной зоне остаются составляющие ЧИМ-сигнала на частоте, равной частоте мо-

дуляции периода дискретизации. В рассмотренном примере это 0,1 Гц (рисунок 5, в). Эти составляющие находятся в той же полосе частот, что и информативные составляющие АИМ-сигнала. Они полностью выделяются ФНЧ наряду с полезным сигналом и искажают его форму.

Заключение

Анализ спектров показал, что частотная импульсная модуляция порождает дополнительные боковые составляющие вокруг составляющих на частотах, кратных частоте дискретизации, которые "зашумляют" спектральные зоны, подлежащие подавлению. Это приводит к тому, что классические алгоритмы СДВ, эффективно работающие с сигналами с АИМ, не могут полностью отфильтровать помехи в сигналах, обладающих двойной модуляцией. Кроме этого, наличие частотной импульсной модуляции приводит к появлению составляющих в нулевой спектральной зоне, в которой расположены и информативные составляющие АИМ-сигнала. Это приводит к искажению восстановленного информативного сигнала.

Таким образом, результаты данной работы обосновывают актуальность разработки модифицированных алгоритмов СДВ, учитывающих эффект двойной модуляции. Целью будущих исследований является создание методов обработки, компенсирующих частотную нестабильность ЭКС, что позволит в полной мере использовать преимущества СДВ в обработке электрокардиосигналов.

Библиографический список

1. Рангайян Р.М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / Пер. с англ. Под ред. А.П. Немирко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 440 с.
2. Михеев А.А., Нечаев Г.И. Способ устранения дрейфа изолинии электрокардиосигнала и устройство для его осуществления. Патент РФ 2251968. МПК А61В5/0402. Опубл. 20.05.2005. Бюлл. № 14.
3. Борисов Ю.П., Пенин П.И. Основы многоканальной передачи информации. М.: Связь. 1967. – 436 с.
4. Yu. Bulgakov, T. Vitiازهva and A. Mikheev Formation of Complex Discrete Samples of Measuring Signals with a Sampling Period Variability/ 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO – 2022) Proceedings. Budva, Montenegro. IEEE Catalog Number: CFP2239T-USB. pp. 275-278.

УДК 617.57-77:681.518.08; ГРНТИ 76.13.15

БИОАДАПТАЦИОННЫЙ ТРЕНАЖЕР ДЛЯ УСКОРЕННЫХ ТРЕНИРОВОК ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ БИОНИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА КИСТИ РУКИ

К.С. Ильичева, Э.М. Султанова, М.М. Тюрина

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
Российская Федерация, Казань, turina_m@mail.ru

Аннотация. В статье представлено решение актуальной задачи сокращения периода адаптации пациентов к бионическим протезам верхних конечностей. Обоснована необходимость применения биоадаптивных тренажеров, реализующих принцип биологической обратной связи для ускорения формирования моторных навыков. На основе патентно-реферативного анализа определены технические требования к устройству тактильного канала. Приведены результаты моделирования системы сбора и преобразования сигнала в среде LabVIEW, подтвердившие её функциональность. В заключении статьи представлены описание конструкции опытного образца, обеспечивающего световую, звуковую и вибрационную индикацию силы сжатия.

Ключевые слова: биоадаптивный тренажер, тензометрический датчик, биологическая обратная связь, моторное обучение, модель, конструкция.

A BIOADAPTIVE SIMULATOR FOR ACCELERATED TRAINING OF A BIONIC HAND PROSTHESIS USER

K.S. Ilyicheva, E.M. Sultanova, M.M. Tyurina

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
Russia, Kazan, turina_m@mail.ru

Abstract. This article presents a solution to the pressing problem of reducing the adaptation period for patients using bionic upper limb prostheses. The necessity of employing bioadaptive trainers that implement the principle of biofeedback to accelerate the formation of motor skills is substantiated. Based on a patent and abstract review, the technical requirements for the tactile channel device were determined. The results of modeling the signal acquisition and conversion system in the LabVIEW environment, which confirmed its functionality, are presented. The article concludes with a description of the prototype design, which provides visual, auditory, and vibratory indication of grip force.

Keywords: bioadaptive simulator, strain gauge sensor, biofeedback, motor learning, model, design.

Современные многофункциональные протезы [1-3] требуют от пользователя освоения сложных схем управления (сигналы ЭМГ, управляющие алгоритмы, тактильная/проприоцептивная обратная связь), при этом период адаптации часто оказывается длительным и неравномерным [3], что ограничивает функциональную реализацию потенциала устройства. Биоадаптационный тренажёр, способный в реальном времени подстраивать тренировочные протоколы под индивидуальные физиологические и поведенческие характеристики пользователя, потенциально сокращает время обучения, повышает точность управления протезом и улучшает перенос навыков в бытовую и профессиональную деятельность [4]. Актуальность разработки такого тренажёра для ускоренной подготовки пользователей бионического протеза кисти обоснована совокупностью клинических, технологических и социально-экономических факторов. С научной точки зрения такая разработка опирается на принципы моторного обучения, нейропластичности и адаптивного управления: целенаправленная, постепенно усложняемая и персонализированная тренировка увеличивает вероятность формирования устойчивых кортикоспинальных и сенсомоторных представлений новых моторных схем. Интеграция биологической обратной связи (ЭМГ, кинематика, силы контакта), алгоритмов машинного обучения для оценки состояния обучаемости и адаптации сложности, а также симулированной/реальной тактильной обратной связи обеспечивает замкнутый адаптивный цикл, необходимый для эффективной кластеризации движений и снижения ошибок. С практической точки зрения ожидаемые эффекты включают повышение функциональной независимости пользователя, уменьшение отказов от протеза, снижение времени и затрат на реабилитацию, а также улучшение психологической адаптации.

В основу анализа патентно-реферативных материалов положен поиск возможных существующих биоадаптационных тренажеров и возможных способов адаптации к бионическому протезу. Поиск проводился по следующим международным классификационным индексам (МКИ):

A61F 2/50 – Протезы, не имплантируемые в теле;

G06F 3/00 – Вводные устройства для передачи данных, подлежащих преобразованию в форму, пригодную для обработки в вычислительной машине; выводные устройства для передачи данных из устройств обработки в устройства вывода, например интерфейсы;

G01L 5/00 – Способы или устройства для измерения сил, например удара, работы, механической мощности или вращающего момента, предназначенные для специальных целей.

Созданный биоадаптационный тренажёр относится к области медицины, к протезированию и используется совместно с бионическими протезами верхних конечностей. За период 2004-2025 гг. для структурного синтеза было отобрано 25 патентов на изобретения и полезные модели. Найденные патенты позволили оценить существующие способы и устройства, которые используются для ускоренной адаптации пользователей к использованию биониче-

ских протезов верхних конечностей. На рисунке 1 представлена диаграмма направленности патентов, из которой видно превосходство разработок в сфере тактильных датчиков, устройств с обеспечением тактильных ощущений и систем тактильной связи.

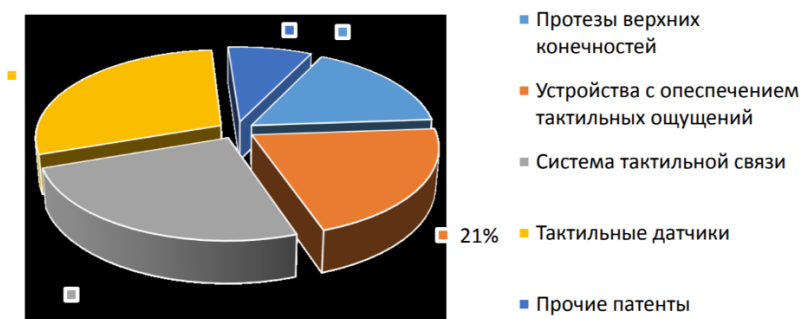


Рис. 1. Диаграмма направленности патентов

Исходя из патентно-реферативного поиска, было выявлено, что большинство существующих разработок (патенты US20090048539, RU2461865 и др.) сфокусированы либо на конструкции самих датчиков, либо на общих принципах тактильной обратной связи. Прямые аналоги комплексных тренажеров, предназначенных именно для обучения управлению бионическим протезом и совмещающих в себе компактный съемный корпус, мультимодальную обратную связь (свет, звук и вибрация) и возможность крепления непосредственно на протез, в рассмотренных патентах обнаружены не были. Это позволяет говорить о новизне предлагаемого конструктивного решения.

На основе проведенного анализа патентной и научно-технической литературы были сформулированы ключевые требования, предъявляемые к конструкции и функционированию разрабатываемого биоадаптивного тренажера [1, 2, 5, 6]. Принципиальными условиями являются: обеспечение малой массы и компактности устройства; возможность его оперативной фиксации на протезе кисти; минимизация времени передачи сигнала от чувствительного элемента к пользователю; наличие тактильного канала, необходимого для регистрации момента и усилия контакта. Кроме того, определены технические параметры, обеспечивающие корректную работу системы:

1. Диапазон измерения	0,1 – 40 Н
2. Максимальный выходной сигнал датчика	не менее 0,5 В
3. Спектр частот	0,3 – 3 Гц
4. Погрешность восстановления	3%
5. Спектр помех	50 Гц
6. Уровень помех	5 мВ
7. Максимальное значение полезного сигнала и помехи	3 Гц, 50 Гц
8. Источник питания	аккумуляторная батарея
9. Температура окружающей среды	± 30 °С

Ключевым компонентом разрабатываемого биоадаптивного тренажера, определяющим эффективность регистрации параметров взаимодействия протеза с внешней средой, является чувствительный элемент тактильного канала. Его основная функция заключается в преобразовании механического усилия, возникающего при контакте бионического «пальца» протеза с предметом, в электрический сигнал, пропорциональный приложенной силе. Выбор типа чувствительного элемента осуществлялся исходя из совокупности требований, обусловленных как особенностями эксплуатации тренажера в системе «протез – внешняя сре-

да», так и физиологическими параметрами естественного схвата. Указанные требования были разделены на две основные группы: конструктивные и метрологические [7].

К конструктивным требованиям отнесены ограничения на массогабаритные параметры датчика. Принимая во внимание необходимость интеграции чувствительного элемента в область контакта протеза, его геометрические размеры не должны превышать площади «подушечки пальца» бионического протеза. Кроме того, для обеспечения равномерного восприятия нагрузки при касании и исключения искажений измеряемого сигнала датчик должен иметь плоскую рабочую поверхность.

Вторую группу составляют требования к диапазону измеряемых усилий. Согласно данным литературы [2, 3, 5] и результатам экспериментальных исследований, средний показатель силы схвата кисти человека варьируется в пределах от 15 до 45 кг. Следовательно, чувствительный элемент должен обеспечивать достоверные измерения во всем указанном диапазоне, а также обладать необходимой чувствительностью при малых усилиях, характерных для начальной фазы контакта.

Удовлетворение вышеперечисленных критериев является необходимым условием для обеспечения достоверности тактильной информации, поступающей в контур биологической обратной связи, и, как следствие, эффективности тренировочного процесса в целом. Исходя из этого в качестве чувствительного элемента был выбран пленочный тензометрический датчик модели DF9-40. Чувствительный элемент датчика выполнен на основе наноматериалов, чувствительных к давлению, что обеспечивает высокую точность измерений. Конструктивно датчик представляет собой ультратонкую подложку с нанесенным рисунком, обладающую необходимыми упругими характеристиками. Корпус датчика является влагонепроницаемым. Принцип действия основан на изменении электрического сопротивления материала под действием внешнего давления, что позволяет регистрировать усилие прикосновения. В таблице 1 представлены характеристики тензометрического датчика DF9-40. На рисунке 2 представлен внешний вид и электрическая схема датчика.

Таблица 1. Характеристики тензометрического датчика DF9-40

Наименование характеристики	Диапазон изменения
Диапазон силы	0-10 кг
Толщина	< 0,3 мм
Чувствительная точка	< 20g
Повторяемость	<±5.8% (50% от нагрузки)
Точность	±2,5% (85% от диапазона силы)
Долговечность	> 1 миллион раз
Начальное сопротивление	> 10MΩ (без нагрузки)
Время срабатывания	< 1 мс
Время восстановления	< 15 мс
Напряжение тестирования DC	3.3V
Рабочая температура	-20°C - 60°C

Местом размещения чувствительного элемента выбран большой палец полуперчатки [8], что позволяет регистрировать усилие в точке непосредственного контакта протеза с объектом манипулирования

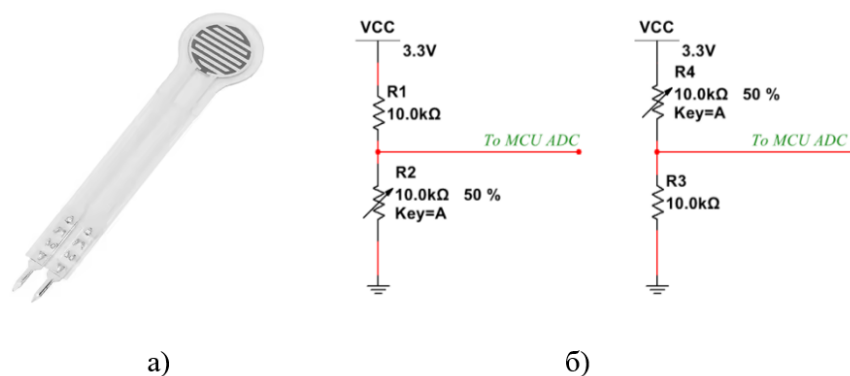


Рис. 2. Пленочный тензометрический датчик DF9-40

С целью верификации работоспособности предложенных схемотехнических решений тактильного канала биоадаптационного тренажера было выполнено его моделирование в среде графического программирования *LabVIEW*. Передача сигнала, регистрируемого чувствительным элементом, реализована посредством амплитудной модуляции. Модулированный сигнал описывается выражением вида: $X(t) = a \cdot x + b$. Блок-диаграмма и лицевая панель разработанной виртуальной модели приведены на рисунке 3.

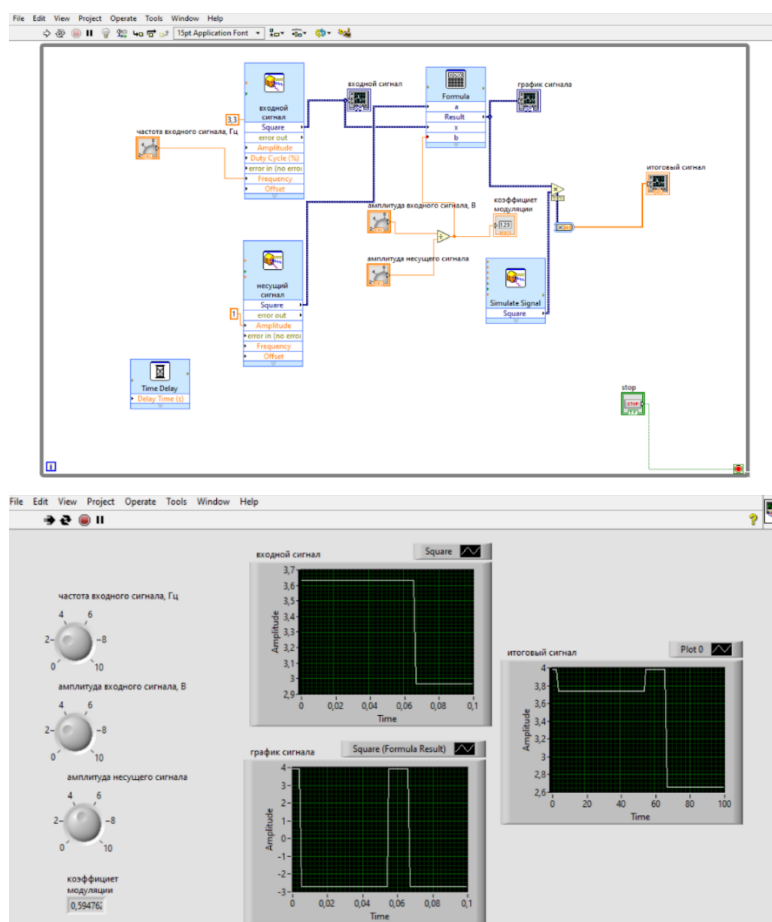


Рис. 3. Блок-диаграмма проектируемой системы и лицевая панель выходных сигналов проектируемого канала

Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенного варианта схемотехнического решения. Вариация амплитуды входного сигнала, имитирующего показания тензометрического датчика, вызывает пропорциональное изменение выходного сигнала.

ла на осциллограмме. Данная зависимость свидетельствует о корректном реагировании системы на изменение усилия сжатия объекта в сторону увеличения или уменьшения.

На основании разработанных трехмерных моделей [8] (рисунок 4) методом аддитивного производства (3D-печати) изготовлены верхние элементы корпуса тренажера в количестве пяти экземпляров, окрашенных в зеленый и черный цвета. Предусмотрена возможность изменения цветового решения корпуса в соответствии с индивидуальными предпочтениями пользователя. Нижняя часть корпуса выполнена из стали, что обеспечивает механическую прочность конструкции тактильного канала (рисунок 5). Общий вид собранного корпуса представлен на рисунке 6.



Рис.4. 3D-модель тренажера



Рис. 5. Основание корпуса тренажера

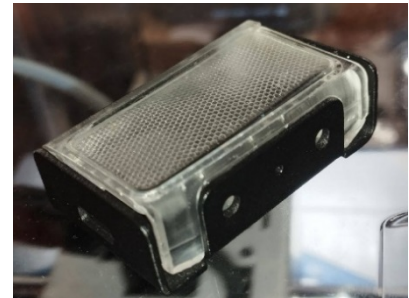


Рис. 6. Корпус тренажера

Электронная плата размещается внутри разъемного двухкомпонентного корпуса и фиксируется посредством четырех винтовых соединений (рисунок 7). Лицевая панель экрана тренажера изготовлена из оргстекла.

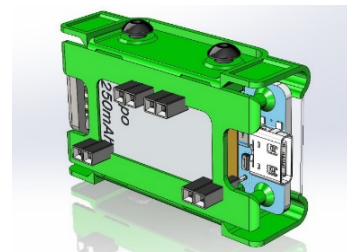
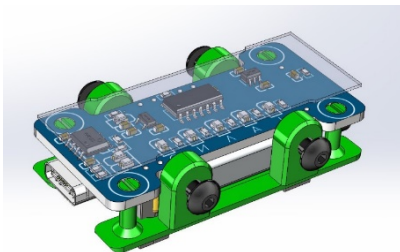


Рис. 7. 3D-модель крепления платы внутри корпуса

На корпусе устройства расположена тактильная кнопка, предназначенная для переключения режимов индикации усилия сжатия. Пользователь имеет возможность выбора одного из трех способов отображения информации: световая, звуковая или вибрационная индикация. Это позволяет оперативно получать обратную связь о достаточности или недостаточности приложенного усилия при манипуляции предметом.

Разработка биоадаптивного тренажера осуществлена в рамках реализации гранта «Студенческий стартап». По результатам работы зарегистрировано юридическое лицо ООО «КАСАНИЕ» и изготовлено пять действующих образцов устройства, готовых к применению в процессах реабилитации и адаптации пациентов с ампутациями верхних конечностей, использующих бионические протезы. Разработанное устройство реализует метод биологической обратной связи, обеспечивая пользователю бионического протеза возможность объективного контроля степени сокращения сохранных мышц культи в процессе тренировок. Отличительной особенностью тренажера является наличие трех альтернативных каналов обратной связи (светового, звукового и вибрационного), что позволяет индивидуализировать процесс обучения в соответствии с сенсорными предпочтениями пациента. Применение тре-

нажера обеспечивает не только визуализацию и аудиальный контроль мышечной активности, но и формирование у пользователя навыков произвольного управления протезом с возможностью оперативной коррекции двигательных паттернов. Клинический эффект от использования устройства выражается в сокращении времени [9], необходимого для адаптации к протезу и его интеграции в повседневную жизнедеятельность.

Библиографический список

1. Протезирование верхних конечностей // Официальный сайт компании OttoBock [Электронный ресурс] URL: <http://www.ottobock.ru/prosthetics/upper-limb-prosthetics/>, режим доступа – свободный.
2. Протезы рук // Официальный сайт компании Novea [Электронный ресурс] URL: <http://novea.msk.ru/prosthetic-hand.html>, режим доступа – свободный.
3. Матов И.Б. Реабилитация при повреждениях руки / Иван Б. Матов, Стефан Д. Банков; [Пер. с болг. Татьяны В. Матвеевой]. – София : Медицина и физкультура, 1981. – 256 с.
4. Ильичева, К. С. Современные подходы адаптации к использованию бионического протеза кисти руки / К. С. Ильичева // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы - Биомедсистемы-2024 : Сборник трудов XXXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, 04–06 декабря 2024 года. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2024. – С. 348-352.
5. Славуцкий, Я.Л. Физиологические аспекты биоэлектрического управления протезами. – М.: Медицина, 1982. – 146с.
6. Биологическая обратная связь // Национальный медицинский исследовательский центр психиатрии и неврологии им. В.М. Бехтерева. [Электронный ресурс]. – URL: <https://bekhterev.ru/clinic/fizioterapevticheskoe-otdelenie/biologicheskaja-obratnaja-svjaz/> режим доступа – свободный.
7. Ильичева, К. С. Адаптационный тренажер для пользователей бионических протезов верхних конечностей / К. С. Ильичева, М. М. Тюрина // Медицинские приборы и технологии : Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Тула, 26 марта 2025 года. – Тула: ФГБОУ ВО "Тульский государственный университет", 2025. – С. 207-213.
8. Ильичева, К. С. Разработка дизайн-концепции тренажера для пользователей бионического протеза верхней конечности / К. С. Ильичева // Инженерная мысль : сборник докладов II Республиканской научно-практической конференции, Казань, 28 ноября 2024 года. – Казань: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ», 2024. – С. 183-186.
9. Ильичева, К. С. Исследования способов тренировок до и после этапа протезирования / К. С. Ильичева, М. М. Тюрина // Физическое воспитание и студенческий спорт глазами студентов : материалы X Международной научно-практической конференции, Казань, 13 декабря 2024 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ, 2024. – С. 765-767.

УДК 621.391; ГРНТИ 49.03.03

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА БЕСКОНТАКТНОГО МОНИТОРИНГА СНА И ФИЗИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ МЛАДЕНЦА

М.А. Любавина

Тамбовский государственный технический университет,
Россия, Тамбов, milenaliubavina@mail.ru

Аннотация: разработано приложение, включающее систему мониторинга и анализа сна младенца, в целях оптимизации режима сна и улучшения качества жизни как ребенка, так и родителя. В основе приложения лежит комплексный подход, объединяющий ручной ввод данных о дневном сне с автоматизированным ночным мониторингом.

Ключевые слова: приложение, ребенок, сон, датчик, Android.

INTELLIGENT SYSTEM FOR CONTACTLESS MONITORING OF INFANT SLEEP AND PHYSICAL DEVELOPMENT

M.A. Lyubavina

Tambov State Technical University,
Russia, Tambov, milenaliubavina@mail.ru

Abstract. An application has been developed that includes a system for monitoring and analyzing infant sleep in order to optimize sleep patterns and improve the quality of life of both the child and the parent. The application is based on an integrated approach that combines manual data entry on daytime sleep with automated nighttime monitoring.

Keywords: application, child, sleep, sensor, Android.

Развитие цифровых технологий и сенсорных систем открывает широкие возможности для создания интеллектуальных программно-аппаратных комплексов в сфере мониторинга здоровья человека [1-5]. Особое значение такие решения приобретают в области контроля состояния детей раннего возраста, когда необходим постоянный, но при этом безопасный и неинвазивный контроль жизненно важных параметров. Разработан программно-аппаратный комплекс мониторинга сна и физического развития ребёнка, который сочетает регистрацию двигательной активности, акустический анализ, а также измерение антропометрических показателей - массы тела и роста.

Актуальность проекта обусловлена необходимостью повышения безопасности ребёнка во время сна и созданием инструментов раннего выявления отклонений в физическом развитии. Сон является одним из ключевых факторов гармоничного роста и формирования организма ребёнка. Одновременно регулярный контроль роста и массы тела позволяет своевременно выявлять отклонения от возрастных норм и корректировать питание или режим дня. Предлагаемый комплекс объединяет данные направления в единую интеллектуальную систему.

Аппаратная часть комплекса включает некоторый модуль, размещаемый в матрасе детской кроватки. В состав модуля входят микрофон для регистрации звуковой активности и плача ребёнка, датчик движения (гироскоп или акселерометр) для фиксации смены положения тела и двигательной активности.

Аппаратная часть комплекса построена на базе микроконтроллера NodeMCU с ядром ESP8266 являющимся компактным, но производительным решением, оптимально подходящего для IoT-устройств. Выбор данной платформы обусловлен наличием встроенного модуля Wi-Fi, который обеспечивает стабильную беспроводную передачу данных без использования дополнительных коммуникационных модулей. Достаточная вычислительная мощность микроконтроллера позволяет оперативно обрабатывать сигналы от сенсоров в режиме реального времени, низкое энергопотребление делает систему пригодной для длительной непрерывной работы.

Центральным элементом мониторинга двигательной активности выступает инерционный модуль MPU6050, объединяющий трёхосевой акселерометр и гироскоп. Данные модули точно регистрируют пространственные перемещения и микродвижения тела ребёнка. В рамках разработки была проведена тонкая калибровка чувствительности датчика с учётом особенностей двигательной активности младенца во сне. Алгоритмы обработки данных настроены таким образом, чтобы фиксировать как выраженные макродвижения - перевороты, вздрагивания, активные пробуждения, - так и более слабые колебания, характерные для поверхностных фаз сна.

Контроль звуковой активности реализован с использованием аналогового микрофонного модуля KY-037, оснащённого программируемым усилителем низкой частоты. Особенностью системы является внедрение адаптивного порога чувствительности, автоматически подстраивающегося под фоновый уровень шума в помещении. Алгоритм анализа сигнала включает частотную фильтрацию с выделением диапазона 200–600 Гц, характерного для

детского плача. Это позволяет эффективно отсекаать бытовые шумы и повышает точность распознавания акустических признаков пробуждения. Общая схема аппаратной части представлена на рисунке 1.

Алгоритмы анализа сна реализуют определение момента засыпания на основе запуска таймера в интерфейсе приложения. Пробуждение определяется при превышении установленных порогов активности или звука. Система регистрирует общее время сна, количество и длительность ночных пробуждений, формирует статистику за сутки и неделю, а также строит графики распределения сна по часам.

Дополнительным функциональным блоком комплекса является модуль контроля физического развития. В систему интегрированы электронные детские весы и электронный ростомер. Весы подключаются к компьютеру через проводной или беспроводной интерфейс и передают данные о массе тела ребёнка в специализированное программное обеспечение. Ростомер аналогично обеспечивает передачу измеренного значения роста. Компьютер выступает в роли центрального узла обработки и хранения данных. Все измерения автоматически сохраняются с указанием даты и времени, формируется индивидуальный профиль ребёнка и ведётся динамика изменений.

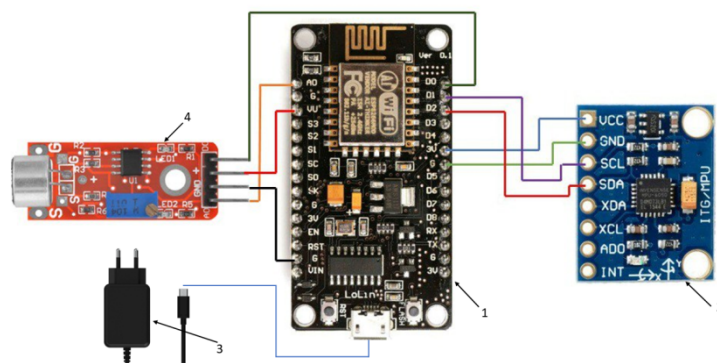


Рис. 1. Схема аппаратной составляющей

Информационная часть приложения была реализована на языке Kotlin в среде Android Studio. Программа разделена на некоторые модули, где каждый из них имеет свои функции и компоненты. Основная активность `MainActivity` отвечает за управление навигацией между экранами, а также координирует работу секундомера и таймера. Три специализированных фрагмента `TimerFragment`, `StopwatchFragment` и `StatsFragment` обеспечивают логическую работу между функциональными блоками таймера, секундомера и графика соответственно. Для хранения данных используется оптимизированная система управления `SleepDataManager`, обеспечивающее структурированное сохранение информации с группировкой по дате записей о сне. Внешний вид приложения представлен на рисунке 2.

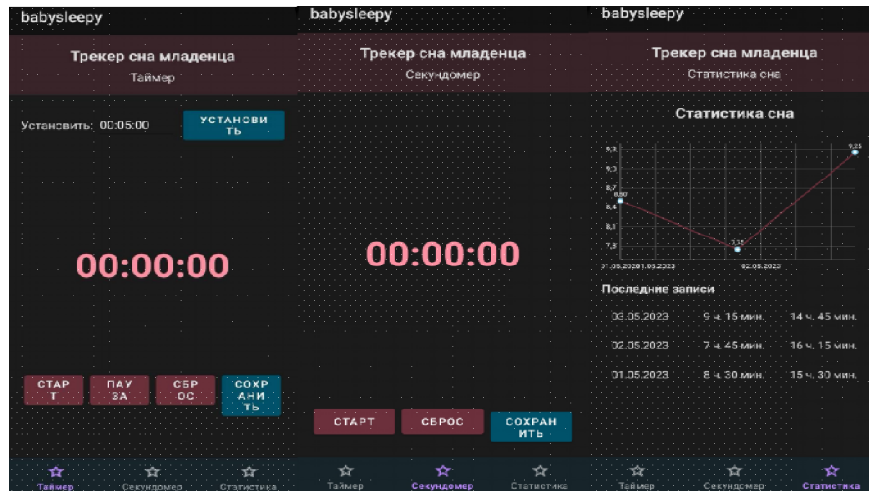


Рис. 2. Внешний вид приложения

Разрабатываемый комплекс отличается интеграцией нескольких функциональных направлений в единую систему. В отличие от отдельных радионянь, весов или мобильных приложений для учёта роста, предлагаемый продукт объединяет мониторинг сна, дыхания и физического развития в рамках одного программно-аппаратного решения.

Перспективы развития проекта связаны с расширением набора контролируемых параметров, включая измерение частоты сердечных сокращений, мониторинг микроклимата помещения и интеграцию с внешними медицинскими информационными системами. Возможна реализация функции формирования отчётов для педиатра и внедрение элементов прогнозной аналитики.

Таким образом, разработанный программно-аппаратный комплекс представляет собой современную интеллектуальную систему мониторинга сна и физического развития ребёнка, обеспечивающую безопасность, автоматизацию сбора данных и удобство использования. Реализация проекта способствует повышению уровня родительского контроля, раннему выявлению возможных нарушений и формированию культуры цифрового сопровождения здоровья ребёнка.

Библиографический список

1. Фролов С.В., Фролова М.С., Потлов А.Ю. Рациональный выбор медицинской техники для лечебно-профилактического учреждения на основе системы поддержки принятия решений // Врач и информационные технологии. – 2014. – №3. – С.35-45.
2. Современные тенденции развития рынка медицинских информационных систем /С. В. Фролов, С. Н. Маковеев, С. В. Семенова, С. Г. Фареа // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 266 – 272.
3. Любавина, М. А. Особенности и нарушения сна у детей / М. А. Любавина, Т. А. Фролова // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : сборник трудов X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной «Дню радио и связи» и 80-летию победы в Великой Отечественной войне, Тамбов, 07 мая 2025 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2025. – С. 245-246.
4. Конструирование приложения для молодых матерей / Т. А. Фролова, Е. П. Евстигнеева, Е. В. Сеченева, Н. Р. Моргунов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: Материалы X Международной научно-практической конференции, Тамбов, 21–22 октября 2024 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2024. – С. 349-351.
5. Любавина, М. А. Приложение для учета и мониторинга сна младенцев / М. А. Любавина, Н. Р. Журавлев, Е. П. Евстигнеева, Т.А. Фролова // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: Материалы XXV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х частях, Гомель, 24–25 апреля 2025 года. – Гомель: Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, 2025. – С. 175-178.

УДК 621.371.391.2; ГРНТИ 90.27.32

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕФЛЕКТОГРАММЫ ИМПУЛЬСНОГО РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКОГО УРОВНЕМЕРА С ОТКЛИКАМИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

С.С. Румянцев

АО «Моринсис-Агат-КИП»
Рязань, R0806rus@yandex.ru

Аннотация. В работе получена математическая модель рефлектограммы импульсного рефлектометрического уровнемера с учётом откликов первого и второго порядка. Это позволяет провести более точное исследование импульсного рефлектометрического уровнемера, однако усложнение модели для более сложных уровнемеров приводит к увеличению числа слагаемых рефлектограммы в арифметической прогрессии.

Ключевые слова: рефлектометрический уровнемер, импульсный рефлектометр, математическая модель

MATHEMATICAL MODEL OF THE REFLECTOGRAM OF A PULSE REFLECTOMETRIC LEVEL METER WITH SECOND-ORDER RESPONSES

S.S. Rumyancev

JSC "Morinsis-Agat-KIP",
Russia, Ryazan, R0806rus@yandex.ru

Abstract. This paper develops a mathematical model of the reflectogram of a pulse reflectometric level meter, taking into account first- and second-order responses. This allows for a more accurate study of the pulse reflectometric level meter. However, the complexity of the model for more complex level meters leads to an arithmetic increase in the number of terms in the reflectogram.

Keywords: reflectometric level gauge, pulsed reflectometer, mathematical model.

Введение

Проектирование и математическое моделирование аппаратуры, реализующей принцип рефлектометрии во временной области (TDR), в частности импульсных рефлектометрических уровнемеров, требует комплексного учета совокупности электродинамических и конструктивных параметров. К числу ключевых факторов относятся волновые сопротивления сегментов измерительного-тракта, геометрические конфигурации, а также диэлектрические характеристики контролируемой среды [1, 2]. Принцип работы данных устройств опирается на регистрацию отражений зондирующего импульса от импедансных неоднородностей, что фиксируется на рефлектограмме в виде характерных откликов, позволяющих идентифицировать локализацию границ раздела сред.

Однако существенной методологической проблемой при моделировании подобных систем является явление многократных переотражений (реверберации). Данный физический эффект, обусловленный циркуляцией части энергии сигнала между неоднородностями измерительного тракта, приводит к наложению паразитных эхо-сигналов и существенной деформации рефлектограммы. Следствием этого выступает деградация метрологических характеристик, выражающаяся в росте инструментальной погрешности. Указанная проблема приобретает критическую значимость в контексте эксплуатации высокоточных измерительных комплексов на объектах повышенной опасности, таких как предприятия нефтегазохимического комплекса или объекты атомной энергетики. В подобных условиях искажение данных или отказ системы мониторинга уровня может повлечь за собой нарушение технологических регламентов и возникновение аварийных ситуаций, что обуславливает высокую актуальность проведения данных исследований.

Целью данной работы является создание математической модели, учитывающей отклики второго порядка в измерительном тракте импульсного рефлектометрического уровнемера.

Физический принцип и описание способа измерения

Конструктивная реализация измерительного тракта импульсного рефлектометрического уровнемера предполагает наличие двух основных функциональных узлов: электронного блока обработки сигналов (вторичного преобразователя) и чувствительного элемента (первичного измерительного преобразователя). В качестве чувствительного элемента преобразователя могут выступать гибкий трос, жесткий стержень либо фазостабильная коаксиальная линия. При этом применение жёсткой фазостабильной коаксиальной линии является наиболее рациональным решением при эксплуатации оборудования в агрессивных химических средах, обеспечивая необходимую стабильность волновых параметров тракта. Электрическое сопряжение чувствительного элемента с электронным блоком осуществляется посредством соединительного коаксиального кабеля через герметичный ввод. Обобщенная структурная схема промышленного импульсного уровнемера, функционирующего на основе технологии рефлектометрии во временной области (TDR), представлена на рисунке 1.

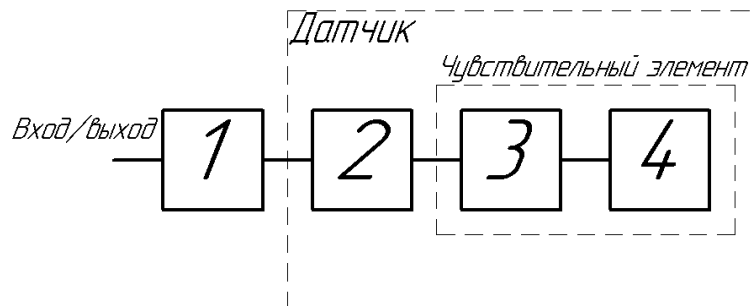


Рис. 1. Структурная схема импульсного рефлектометрического уровнемера

На рисунке 1 показаны: подводящий коаксиальный кабель 1, с одной стороны подсоединённый к электронному блоку (вторичному преобразователю), а с другой стороны к датчику (первичному преобразователю), состоящему из гермоввода 2 и чувствительного элемента, часть которого незатоплена 3, а часть затоплена 4. Представленная схема может быть усложнена, например, измерительный-тракт импульсного рефлектометрического уровнемера, используемого в ядерных энергетических установках дополнительно содержит проходную муфту в перегородке, разделяющей чистую и радиоактивную технологические зоны реактора, и двойной изолятор вместо обычного гермоввода, для исключения возможной утечки радиоактивного пара из системы с высоким давлением и температурой, также реперные метки, расположенные вдоль чувствительного элемента [2].

С точки зрения электродинамики, рассматриваемый измерительный тракт целесообразно представить как неоднородную линию передачи, характеризующуюся дискретным изменением волнового сопротивления вдоль продольной координаты. Величина волнового сопротивления определяется совокупностью электрофизических характеристик среды (удельная электрическая проводимость, относительная диэлектрическая проницаемость) и геометрических параметров поперечного сечения тракта. В частности, для элементов, представимых в виде коаксиальной линии, включая чувствительный элемент и гермоввод, ключевыми геометрическими параметрами выступают диаметры внутреннего и внешнего проводников. Характер распространения зондирующего импульса и соответствующего эхо-сигнала в идеализированной модели, исключая влияние многократных переотражений, показан на рис. 2.

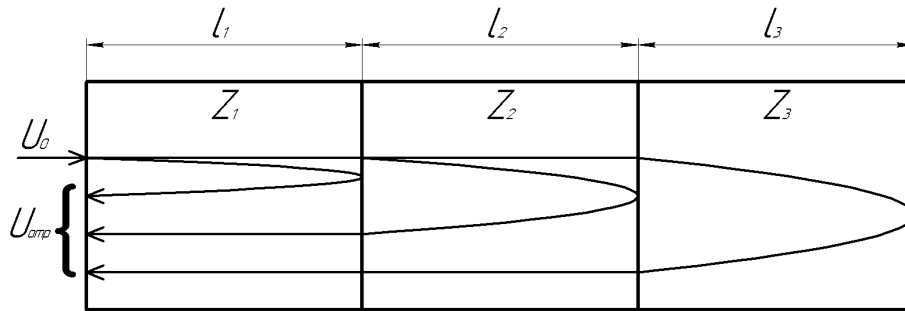


Рис. 2. Распространение электромагнитных волн в неоднородной линии передачи без учёта переотражений

В этом случае временные задержки эхо-сигналов относительно зондирующего импульса Δt_i можно рассчитать по формуле [3]:

$$\Delta t_i = 2 \cdot \sum_i \frac{l_i \sqrt{\varepsilon_i}}{c} = 2 \cdot \sum_i \tau_i \quad (1)$$

где l_i – длина i -го участка измерительного тракта импульсного рефлектометрического уровнемера, м;

ε_i – относительная диэлектрическая проницаемость i -го участка измерительного тракта импульсного рефлектометрического уровнемера;

τ_i – задержка распространения сигнала в i -м участке измерительного тракта импульсного рефлектометрического уровнемера, с.

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

Таким образом, например для импульсного рефлектометрического уровнемера, измерительный тракт которого разделяется на четыре участка неоднородной линии, без учёта потерь, описание эхо сигнала примет вид [4]:

$$\begin{cases} U_{omp1}(t) = R_{12} \cdot U_0(t - 2\tau_1) \\ U_{omp2}(t) = T_{12} \cdot T_{21} \cdot R_{23} \cdot U_0(t - 2\tau_1 - 2\tau_2) \\ U_{omp3}(t) = T_{12} \cdot T_{21} \cdot T_{23} \cdot T_{32} \cdot R_{34} \cdot U_0(t - 2\tau_1 - 2\tau_2 - 2\tau_3) \\ U_{omp4}(t) = -T_{12} \cdot T_{21} \cdot T_{23} \cdot T_{32} \cdot T_{34} \cdot T_{43} \cdot U_0(t - 2\tau_1 - 2\tau_2 - 2\tau_3 - 2\tau_4) \end{cases} \quad (2)$$

где $R_{12}, R_{21}, R_{23}, R_{32}, R_{34}, R_{43}$ – соответствующие коэффициенты отражения, причём связанные соотношениями:

$$\begin{cases} R_{12} = -R_{21} \\ R_{23} = -R_{32} \\ R_{34} = -R_{43} \end{cases} \quad (3)$$

Зная коэффициенты отражения, становится возможным найти коэффициенты прохождения для каждого участка в прямом и обратном направлении:

$$\begin{cases} T_{12} = 1 + R_{12} \\ T_{21} = 1 + R_{21} \end{cases} \quad \begin{cases} T_{23} = 1 + R_{23} \\ T_{32} = 1 + R_{32} \end{cases} \quad \begin{cases} T_{34} = 1 + R_{34} \\ T_{43} = 1 + R_{43} \end{cases} \quad (4)$$

В случае диссипативной среды следует учитывать коэффициент передачи i -го участка измерительного тракта импульсного рефлектометрического уровнемера V_i , который определяется по формуле:

$$V_i = 10^{-\frac{\alpha_i l_i}{20}}. \quad (5)$$

где α_i – коэффициент затухания, дБ/м.

В действительности с выхода измерительного тракта импульсного рефлектометрического уровнемера на вторичный преобразователь поступают не только первичные отклики, с задержками рассчитанными с применением выражения (1), но и паразитные сигналы, возникающие в результате многократных переотражений на границах между участками измерительного тракта (рис. 3).

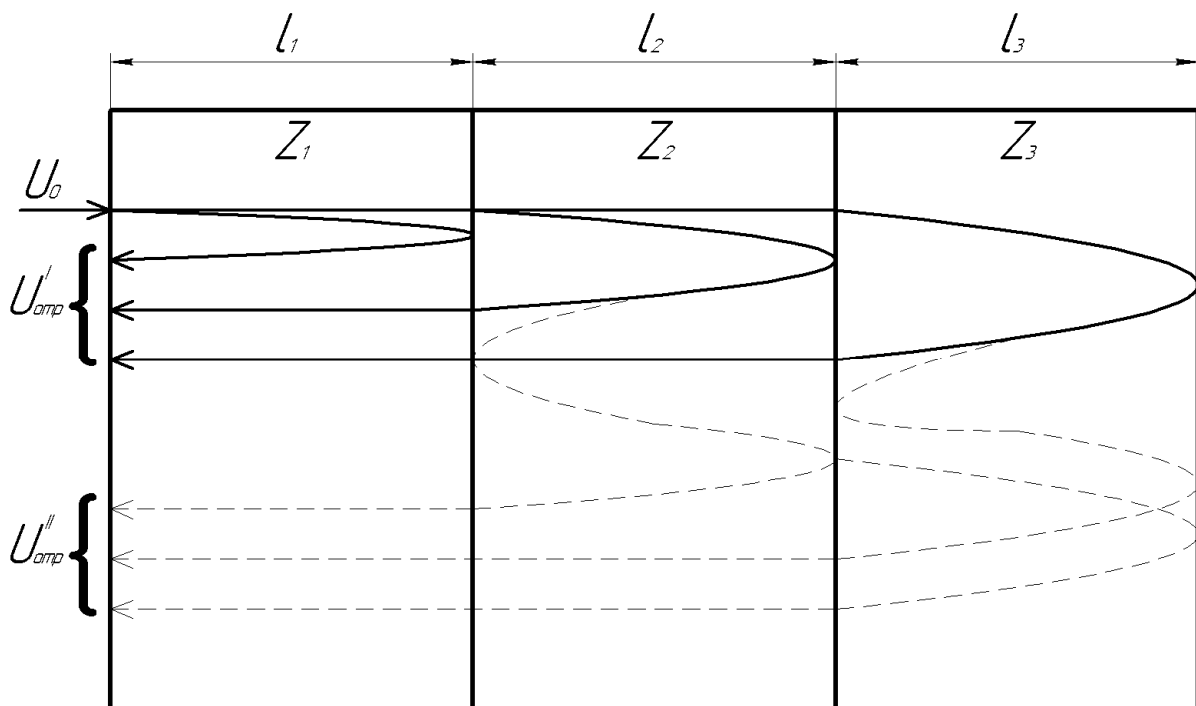


Рис. 3. Распространение электромагнитных волн в неоднородной линии передачи с учётом многократных переотражений

На рисунке 3 схематично изображены пути возникновения откликов первого ($U_{отр}^1$) и второго ($U_{отр}^2$) порядка, однако в отсутствие потерь в измерительном тракте могут обнаруживаться отклики и более высоких порядков.

Математическое описание вторичных откликов

Опираясь на формулу (2) и учитывая рис. 3 можно построить математическое описание откликов второго порядка для измерительного тракта представленного в виде неоднородной линии, состоящей из четырёх сегментов.

В этом случае компонента $U_{отр2}(t)$ отразившись от границы между 1 и 2 участком линии породит три отклика в 2, 3 и 4 участках:

$$\begin{cases} U_{\text{omp}2-3}^2 = T_{12} \cdot R_{23}^2 \cdot R_{21} \cdot T_{21} \cdot U_0(t - 2\tau_1 - 4\tau_2) \\ U_{\text{omp}2-3}^2 = T_{12} \cdot R_{23}^2 \cdot R_{34} \cdot T_{21} \cdot T_{23} \cdot T_{32} \cdot U_0(t - 2\tau_1 - 4\tau_2 - 2\tau_3) \\ U_{\text{omp}2-4}^2 = -T_{12} \cdot R_{23}^2 \cdot T_{21} \cdot T_{23} \cdot T_{32} \cdot T_{34} \cdot T_{43} \cdot U_0(t - 2\tau_1 - 4\tau_2 - 2\tau_3 - 2\tau_4) \end{cases}$$

Компонента $U_{\text{omp}3}(t)$ отразится от границы между 2 и 3 участком линии и это приведёт к появлению ещё двух откликов:

$$\begin{cases} U_{\text{omp}3-3}^2 = T_{12} \cdot T_{23} \cdot R_{34}^2 \cdot R_{32} \cdot T_{32} \cdot T_{21} \cdot U_0(t - 2\tau_1 - 2\tau_2 - 4\tau_3) \\ U_{\text{omp}3-4}^2 = -T_{12} \cdot T_{23} \cdot R_{34} \cdot R_{32} \cdot T_{32} \cdot T_{21} \cdot U_0(t - 2\tau_1 - 2\tau_2 - 4\tau_3 - 2\tau_4) \end{cases}$$

Компонента $U_{\text{omp}4}(t)$ добавит еще один отклик второго порядка:

$$U_{\text{omp}4-4}^2 = T_{12} \cdot T_{23} \cdot T_{23} \cdot R_{43} \cdot T_{43} \cdot T_{32} \cdot T_{21} \cdot U_0(t - 2\tau_1 - 2\tau_2 - 2\tau_3 - 4\tau_4)$$

Полученная математическая модель позволяет описать импульсный рефлектометрической уровнемер, путем представления его в виде неоднородной коаксиальной линии, состоящей из 4 участков с учётом откликов до второго порядка включительно.

Вывод

В результате проведенной работы было получено математическое импульсного рефлектометрического уровнемера, позволяющее получить рефлектограмму с откликами второго порядка. Эту модель можно использовать в проектировании импульсных рефлектометрических уровнемеров, однако следует учесть, что дополнение модели дополнительным числом участков линии приведет к её значительному усложнению. Так если в представленной модели четыре участка приводят к появлению четырех откликов первого порядка и шести откликов второго порядка, то при расширении на пять участков: откликов первого порядка будет пять, а откликов второго порядка – 10. Таким образом число слагаемых для получения итоговой рефлектограммы будет возрастать в арифметической прогрессии.

Библиографический список

1. Тренкаль Е.И. Измерение уровней жидкости методом импульсной рефлектометрии (обзор) / Е.И. Тренкаль, А.Г. Лоцилов // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 67–73.
2. Корячко В.П. Математическая модель рефлектометрического уровнемера для измерения уровня воды в контуре ядерной энергетической установки / В.П.Корячко, С.С.Румянцев, Л.В.Аронов // Вестник РГРТУ. Рязань. РГРТУ. 2023. Вып. 2 (84). С. 157-165. DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-157-165
3. Тренкаль Е.И. Алгоритм селекции полезных сигналов в задаче TDR-измерения уровней многофазных жидкостей / Е.И. Тренкаль, А.Г. Лоцилов // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2016. – № 1. – С. 222–226.
4. Yahya S.I. A multi-level storage tank gauging and monitoring system using a nanosecond pulse // International journal of engineering trends and technology (IJETT). – 2013. – Vol. 5, No. 1. – PP. 17–24.

УДК 004.5; ГРНТИ 28.17.33

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ПРОТОТИПА УМНЫХ ОЧКОВ С ФУНКЦИЕЙ ТРАНСКРИБИРОВАНИЯ РЕЧИ ДЛЯ ИНВАЛИДОВ ПО СЛУХУ

А.В. Кузнецова, И.Э. Петров, С.В. Фролов

Тамбовский государственный технический университет,
Российская Федерация, Тамбов, irinka.dro@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматриваются инженерно-эргономические аспекты разработки прототипа умных очков для людей с нарушениями слуха, обеспечивающих транскрипцию речи в режиме реального времени. Анализируются требования к оптической схеме отображения, включая расположение дисплея и характеристики волноводных линз. Обосновываются параметры шрифтов и дисплея с учетом особенностей периферического зрения и длительности использования. Приводятся технические решения на основе анализа существующих коммерческих и экспериментальных разработок.

Ключевые слова: умные очки, транскрибирование речи, волноводная оптика, дополненная реальность, ассистивные технологии.

FEATURES OF CREATING A PROTOTYPE OF SMART GLASSES WITH SPEECH TRANSCRIPTION FUNCTION FOR THE HEARING IMPAIRED

A.V. Kuznetsova, I.E. Petrov, S.V. Frolov

Tambov State Technical University,
Russia, Tambov, irinka.dro@yandex.ru

The summary. The paper examines the engineering and ergonomic aspects of developing a prototype of smart glasses for people with hearing impairments that provide real-time speech transcription. The requirements for the optical display scheme are analyzed, including the display location and characteristics of waveguide lenses. The parameters of fonts and display are justified, taking into account the peculiarities of peripheral vision and the duration of use. Technical solutions based on the analysis of existing commercial and experimental developments are presented.

Keywords: smart glasses, speech transcription, waveguide optics, microdisplay, augmented reality, assistive technologies.

Проблема социальной интеграции людей с нарушениями слуха остается актуальной, несмотря на развитие сурдоперевода и вспомогательных технологий. Люди с нарушением слуха испытывают сложности распознавания устной речи, шумовые помехи и невозможность визуального контакта с говорящим, а существующие решения типа слуховых аппаратов и специализированных приложений обладают недостатком слабого качества восприятия звуков, низкой точности интерпретации эмоций и ограниченным функционалом в условиях сложного акустического окружения и потому не позволяют эти барьеры преодолеть. На отечественном рынке нет аналогов умных очков с функцией транскрипции речи, которые предназначались бы для людей с проблемами со слухом.

Был разработан прототип умных очков с функцией транскрибирования речи для инвалидов по слуху, который представлен на рисунке 1. При создании устройства команда столкнулась со следующими проблемами: размещение дисплея перед глазами пользователя, удобочитаемость шрифта на дисплее, четкость расшифровки речи.

Наиболее распространены два технологических подхода проецирования текста на линзу:

– Использование микросветодиодных (microLED) дисплеев с волноводами, которые обеспечивают высокую яркость (до 5000 нит) при низком энергопотреблении.

– Внедрение дифракционных волноводных линз из смолы, которые обеспечивают толщину линзы всего 1,8 мм и яркость до 2000 нит при сохранении четкости изображения при движениях головы.



Рис. 1. Прототип умных очков для инвалидов по слуху

При создании прототипа для инвалидов по слуху критически важна монохромность дисплея. Использование зеленого свечения (длина волны 550 нм) оптимально, поскольку глаз обладает максимальной чувствительностью к этому спектру, а также снижается нагрузка при длительном ношении [1].

Существует два решения расположения дисплея и зоны проецирования:

- Периферийное проецирование, когда текст выводится в нижней или боковой части поля зрения, не перекрывая центральную область. Это позволяет одновременно видеть собеседника и читать субтитры.

- Фиксированное положение, при котором дисплей закреплен на правой линзе (монокулярная схема). Для людей с нарушениями слуха предпочтительна монокулярная проекция, поскольку она оставляет вторую линзу свободной для коррекции зрения и не создает эффекта «раздвоения» реальности.

Из требования к параметрам дисплея можно выделить яркость и контрастность, разрешение и размер проекции, частоту обновления и задержку.

Условия эксплуатации умных очков варьируются от помещений до открытого пространства с ярким солнечным освещением. Минимально допустимая яркость дисплея для читаемости на улице составляет 1500 нит, комфортная от 2000 нит.

Разрешение дисплея определяет читаемость мелкого текста. Для отображения 10-15 слов одновременно (средняя длина предложения) требуется разрешение не менее 640×480 пикселей. Размер зоны видимости должен составлять 15×11 мм при удалении от глаза 20-25 мм, что соответствует угловому размеру, позволяющему читать текст без отрыва от рассматривания собеседника.

Критический параметр для транскрибации речи – задержка вывода текста. Психолингвистические исследования показывают, что задержка более 300 мс нарушает восприятие речи как синхронной. При создании прототипа необходимо ориентироваться на данный показатель, обеспечивая буферизацию не более 2-3 слов [2].

В целях соблюдения концепции оптимизированного и экономически эффективного прототипирования в разрабатываемой модели умных очков были использованы OLED-дисплей, дополнительная очковая линза. Дисплей располагается под углом 45° на верхней части оправы макета устройства. Линза в свою очередь размещается на расстоянии 6,8 см от глаза, что минимизирует риски снижения зрения и позволяет ему лучше фокусироваться.

Обработка речевых сигналов в разрабатываемом прототипе осуществлялась посредством интеграции облачного сервиса транскрибации Speech-to-Text на базе платформы Yandex Cloud. Выбор данного алгоритмического решения обусловлен наличием специализированной

русскоязычной лексической базы, а также его устойчивостью к распознаванию речи с учетом фонетических особенностей и акцентов, что позволило минимизировать задержки при передаче текстовых данных на устройство отображения. В аппаратной части для обеспечения сбора акустической информации взамен использовавшегося на предыдущих этапах микрофонного усилителя MAX9814 был интегрирован цифровой всенаправленный MEMS-микрофон INMP441. Применение данного модуля продиктовано необходимостью снижения уровня паразитных шумов при транскрибации и обеспечения устойчивого приема речи на расстоянии до 1,5 метров.

При проекции текста на линзу возникают искажения, связанные с дифракцией и аберрациями. Рекомендуется использование гротесков (шрифтов без засечек) с равномерной толщиной штриха:

- Arial, Helvetica или Roboto для латиницы и кириллицы;
- Моноширинные модификации для обеспечения равномерного межбуквенного просвета при проекции на искривленную поверхность.

Наиболее предпочтительным является полужирный кегль (Medium), обеспечивающий оптимальное заполнение пиксельной структуры и устойчивость к расфокусировке.

Угловой размер символа должен составлять не менее 20-25 угловых минут, что соответствует высоте буквы 5-7 мм на удалении 2 метра (обычная дистанция общения). При проекции на линзу размер шрифта рассчитывается как 3-4% от ширины поля зрения. Межстрочный интервал рекомендуется устанавливать 1.2-1.4 от высоты шрифта для сохранения читаемости при движении головы.

Зеленый цвет (монохром) предпочтителен по физиологическим причинам. Яркость символов должна превышать яркость фона в 3-5 раз для обеспечения эффекта «парения» текста без слияния с объектами реального мира [3-6].

В одной изборок прототипа смарт очков для инвалидов по слуху возникала проблема с масштабом текста на OLED-дисплее, из-за чего невозможно было прочитать транскрибированную речь. Это наглядно представлено на рисунке 2. Проблему удалось устранить посредством изменения настроек параметров дисплея и шрифта текста.



Рис. 2. Результат распознавания речи при неправильных настройках дисплея

При создании прототипа умных очков необходимо обеспечить:

- Модульность конструкции – возможность замены линз на рецептурные
- Время работы не менее 4-5 часов активной транскрибации
- Минимальный вес не более 50-60 грамм

Отдельного внимания заслуживает микрофонная система. Для точной транскрибации в шумной обстановке требуется не менее 2-4 микрофонов с алгоритмами шумоподавления и идентификации говорящего [7-10].

Подводя итоги, можно сказать, что сборка прототипа умных очков для людей с нарушениями слуха требует комплексного решения оптических, эргономических и типографических задач. В перспективе планируется продолжать работать над созданием эргономичного макета устройства, заменить нынешнюю оптическую систему на волноводную, добиться наиболее точного распознавания речи.

Библиографический список

1. Rhodin, H. Comparison of augmented reality glasses for the assistive communication support of hearing loss / H. Rhodin, I. Ersoy, S. Aygun [et al.] // *Frontiers in Neurology*. – 2025. – Vol. 16. – Article 1635699. – DOI: 10.3389/fneur.2025.1635699.
2. McLaughlin, D.J. Sequence effects and speech processing: cognitive load for speaker-switching within and across accents / D.J. McLaughlin, V.A. Brown, K.J. Van Engen // *Psychonomic Bulletin & Review*. – 2024. – Vol. 31, № 1. – P. 176–186. – DOI: 10.3758/s13423-023-02322-1.
3. Lulaci, T. Temporal dynamics of coarticulatory cues to prediction / T. Lulaci, P. Söderström, M. Tronnier, M. Roll // *Frontiers in Psychology*. – 2024. – Vol. 15. – P. 1–9. – DOI: 10.3389/fpsyg.2024.1394172/
4. Li, K. Collaborative Hybrid Propagator for temporal misalignment in audio-visual segmentation / K. Li, Z. Wang, Q. Liu [et al.] // *arXiv [Электронный ресурс]*. – 2024. – Препринт № arXiv:2412.08161. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2412.08161>. – Дата доступа: 23.02.2026.
5. Vasudevan, A.B. Temporally aligned audio for video with autoregression / A.B. Vasudevan, S. Das, P. Sharma // *arXiv [Электронный ресурс]*. – 2024. – Препринт № arXiv:2409.13689. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2409.13689>. – Дата доступа: 23.02.2026.
6. Ma, Y. AVicuna: Audio-Visual LLM with interleaver and context-boundary alignment for temporal referential dialogue / Y. Ma, Z. Chen, W. Wang [et al.] // *arXiv [Электронный ресурс]*. – 2024. – Препринт № arXiv:2403.16276. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2403.16276>. – Дата доступа: 23.02.2026.
7. Segawa, K. Bridging the auditory gap: AR smart glasses for real-time speech-to-text and directional audio visualization for the hearing-impaired / K. Segawa, T. Watanabe, H. Tanaka [et al.] // *IEICE Communications Express*. – 2025. – Vol. 14, № 7. – P. 279–282. – DOI: 10.23919/comex.2025XBL0061.
8. Фролова, Т. А. Information models of a medical device for its evaluation / Т. А. Фролова, М. С. Фролова, И. А. Толстухин // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2015. – Т. 21. – № 4. – С. 587–591.
9. Фролова, М.С. Информационная модель медицинской техники на основе объектно-ориентированного подхода / М. С. Фролова, Т. А. Фролова, И. А. Толстухин // *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*. – 2015. – №4(58). – С.139-145.
10. Кузнецова, А. В. Медицинские датчики в умных очках для слабослышащих и глухих людей / Т.А. Фролова, А. В. Кузнецова, И. Э. Петров // *Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : Материалы XXV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х частях, Гомель, 24-25 апреля 2025 года*. – Гомель: Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого. – 2025. – С. 195-197.

УДК 621.391:57; ГРНТИ 28.23.27

РАЗРАБОТКА ДЕМОНСТРАЦИОННОГО СТЕНДА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

Р.О. Виклов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, roman.viklov@yandex.ru*

Аннотация. В работе рассматривается разработка демонстрационного стенда на базе радиолокационного модуля для бесконтактного анализа вариабельности сердечного ритма (ВСР). Предложен алгоритм обработки радиосигналов, включающий Range FFT, формирование доплеровского сигнала, фильтрацию Чебышева II типа и анализ межпиковых интервалов. Экспериментально установлена связь между вариабельностью сердечного ритма и частотой дыхания: за минуту записи зарегистрировано 6 периодов дыхания и соответствующее изменение мгновенной частоты сердечных сокращений от 48.2 до 94.7 уд/мин. Полученные статистические параметры ВСР (средний интервал 0.809 с, SDNN 0.100 с) соответствуют нор-

мальной физиологической реакции здорового человека. Показаны преимущества и недостатки предложенного метода.

Ключевые слова: вариабельность сердечного ритма, радиосигнал, фильтр Чебышева, доплеровский сигнал, бесконтактная диагностика, дыхательная аритмия.

DEVELOPMENT OF A DEMONSTRATION STAND AND INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF USING RADIO SIGNALS TO ANALYZE HEART RATE VARIABILITY

R.O. Viklov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, roman.viklov@yandex.ru*

The summary. The paper considers the development of a demonstration stand based on a radio location module for non-contact analysis of heart rate variability (HRV). An algorithm for processing radio signals is proposed, including Range FFT, Doppler signal generation, Chebyshev type II filtering, and peak interval analysis. A relationship between heart rate variability and respiratory rate has been experimentally established: 6 breathing periods and a corresponding change in the instantaneous heart rate from 48.2 to 94.7 beats/min were recorded per minute of recording. The obtained HRV statistical parameters (mean interval 0.809 s, SDNN 0.100 s) correspond to the normal physiological response of a healthy person. The advantages and disadvantages of the proposed method are shown.

Keywords: heart rate variability, radio signal, Chebyshev filter, Doppler signal, non-contact diagnostics, respiratory arrhythmia.

Современные методы бесконтактной диагностики сердечно-сосудистой системы представляют значительный интерес для развития персональных медицинских устройств. Вариабельность сердечного ритма (ВСР) является более информативным показателем, отражающим состояние вегетативной нервной системы и общее здоровье организма.

Сущность вариабельности сердечного ритма

Вариабельность сердечного ритма представляет собой физиологическое явление, заключающееся в изменении интервалов между последовательными сердечными сокращениями. Согласно теоретическим представлениям, при вдохе под влиянием симпатической нервной системы частота сердечных сокращений увеличивается, а при выдохе – уменьшается под действием парасимпатической системы [1]. Это явление, известное как дыхательная аритмия, является здоровой физиологической реакцией и может быть зарегистрировано с помощью бесконтактных радиолокационных методов.

Описание экспериментального стенда и алгоритма обработки

Демонстрационный стенд включает в себя радиолокационный модуль и персональный компьютер для записи сигналов с помощью специального ПО и последующей их обработки в программной среде. Зондирующий сигнал представляет собой последовательность линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) импульсов с параметрами: длительность импульса 256 отсчетов, 128 импульсов на кадр, 1536 кадров записи.

Алгоритм обработки данных состоит из нескольких этапов, которые будут рассмотрены далее. Цель заключается в том, чтобы убедиться, что радиолокационный подход может использоваться для регистрации ВСР, а также для анализа связи ВСР с дыханием.

Первый этап - формирование четырёхмерной матрицы исходных данных

Исходные данные, представленные в виде 16-битных целых чисел, группируются в четырёхмерный массив. На первом этапе выполняется быстрое преобразование Фурье (FFT). Эта операция, известная как Range FFT, обеспечивает разрешение по дальности и позволяет

выделить сигналы, отражённые от объекта на определённом расстоянии [2]. В работе исследуются 3 - 5 канала дальности (14 - 33 см) – именно такое расстояние является оптимальным для изменения ЧСС и variability.

Второй этап - формирование доплеровского сигнала

Для выбранного канала дальности формируется одномерный доплеровский сигнал. Этот сигнал содержит фазовую информацию о движении грудной клетки, обусловленном дыханием и сердцебиением. Фаза сигнала извлекается и подвергается развёртке для устранения скачков, кратных 2π .

Третий этап – полосовая фильтрация с использованием фильтра Чебышева

В данном исследовании используется фильтр Чебышева II типа. Выбор обусловлен его способностью обеспечивать более крутой срез амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) по сравнению с фильтром Баттерворта при том же порядке [3].

Параметры фильтра, определённые экспериментально:

- Полоса пропускания: 0.5 – 2.3 Гц
- Порядок фильтра: 3
- Подавление в полосе задерживания: 40 дБ

На рисунке 1 представлены спектры исходного сигнала и выходного сигнала после фильтрации. Видно, что фильтр эффективно подавляет низкочастотную составляющую дыхания (ниже 1 Гц) и высокочастотные шумы.

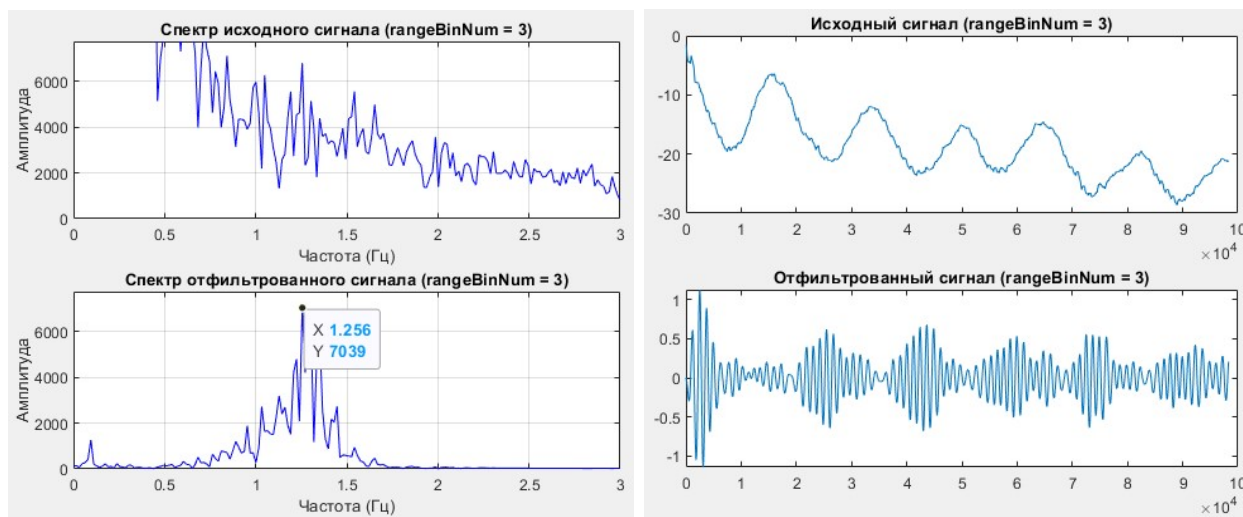


Рис. 1. Спектры исходного сигнала и сигнала на выходе фильтра, а также их временные графики

Максимальная амплитуда в спектре находится на частоте 1.256 Гц. Это частота сердцебиения: 75.3 уд/мин.

На временных графиках можно увидеть огибающую дыхания. За время записи (ровно 1 минута) было совершено 6 периодов дыхания (вдох-выдох). Также в исходном сигнале можно заметить сердцебиение – небольшие всплески на огибающей, примерно 12 ударов на один период дыхания. На выходном сигнале сердцебиение видно чётко и можно произвести измерение variability.

Четвёртый этап – анализ variability сердечного ритма

Для оценки ВСР в выходном сигнале производится поиск пиков, соответствующих систолическим ударам. Параметры поиска:

- Порог по амплитуде: 0.1% от максимума
- Минимальное расстояние между пиками: $0.4 * fs$ (соответствует ~ 150 уд/мин)

Для каждой пары последовательных пиков вычисляется интервал в отсчётах, который затем переводится в секунды и в удары в минуту (уд/мин) по формуле:

Мгновенное значение ЧСС = $60 * fs / \text{интервал_в_отсчётах}$.

На рисунке 2 показан выходной сигнал с отмеченными пиками (верхний график) и график мгновенной ЧСС (нижний график), наглядно демонстрирующий variability, связанную с дыхательными циклами.

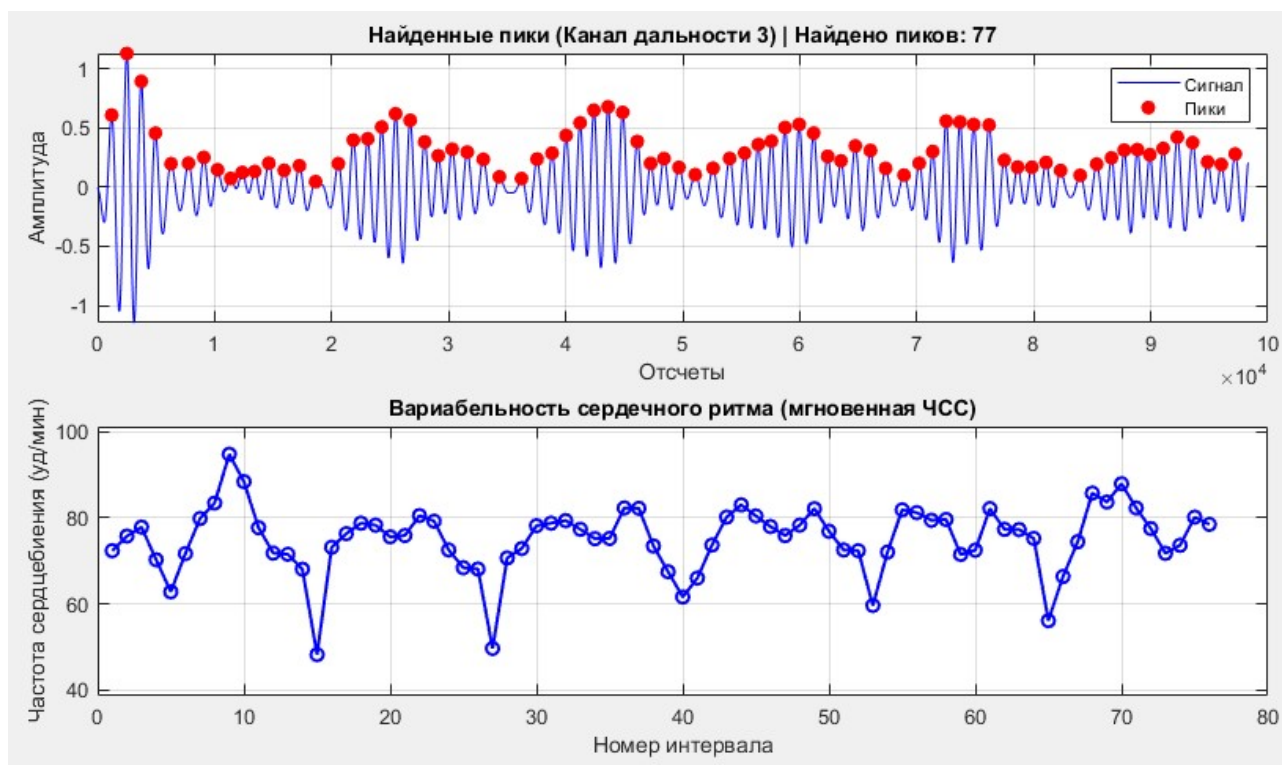


Рис. 2. График выходного сигнала и наглядное представление variability

Запись сигнала не идеальна, поэтому на графике присутствуют погрешности, однако, с уверенностью можно заметить 6 повторяющихся периодов variability – 6 периодов дыхания.

Результаты

Таким образом, возможность регистрации ВСР радиолокационным методом подтверждена в ходе эксперимента, а также произведён анализ связи ВСР с дыханием.

Анализ межпиковых интервалов позволил выявить следующие статистические характеристики ВСР:

- Средний интервал сердцебиения 0.809 с (75.1 уд/мин)
- Средняя ЧСС определённая по спектру 1.256 Гц (75.3 уд/мин)
- Минимальная мгновенная ЧСС (при выдохе) 0.634 с (48.2 уд/мин)
- Максимальная мгновенная ЧСС (при вдохе) 1.244 сек (94.7 уд/мин)
- Стандартное отклонение (SDNN) 0.100 сек

Полученные значения SDNN и вариации мгновенной ЧСС соответствуют нормальной физиологической реакции здорового человека в состоянии покоя.

Предложенный метод обладает следующими особенностями:

- Преимущества:
 - Простота реализации;
 - Малая вычислительная сложность (не требует вейвлет-преобразования);
 - Возможность точного измерения ВСР.
- Недостатки:
 - Чувствительность к выбору параметров фильтра (порядок, частота среза, пульсации);
 - Необходимость выбора канала дальности пользователем по лучшему спектру (либо должны быть известны параметры записи);
 - Точность результата сильно зависит от условий эксперимента: неподвижности объекта исследования, окружающей шумовой обстановки.

Полученные статистические параметры ВСР могут быть использованы для дальнейшей диагностики состояния сердечно-сосудистой и вегетативной нервной систем.

Перспективным направлением дальнейших исследований является автоматизация выбора оптимального канала дальности и адаптивная настройка параметров фильтра под индивидуальные особенности пациента.

Библиографический список

1. Баевский Р.М., Иванов Г.Г. Вариабельность сердечного ритма: теоретические аспекты и возможности клинического применения // Ультразвуковая и функциональная диагностика. – 2001. – № 3. – С. 108-127.
2. MIMO radar signal processing. Jian Li, Petre Stoica. John Wiley & Sons, Inc. 10 окт. 2008 г. 472 с.
3. Enhanced SIMO Radar System Based on Time-Frequency Correlation for Target Localization Applications. Le ZOU, Xuetian WANG, Lihua ZHANG, Hongmin GAO. Dept. of School of Integrated Circuits and Electronics, Beijing Institute of Technology, 100081, Beijing, China. October 7, 2022.

СЕКЦИЯ «СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ»

УДК 339.142; ГРНТИ 06.71.

**НОРМИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОСНОВЕ
СТАТИСТИЧЕСКИХ ОЦЕНОК ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ****А.И. Сойко, Д.А. Савельева***Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,
Казань, savelevadasha2004@mail.ru*

Аннотация. В работе рассматривается проблема установления требований к точности средств измерений (СИ) в условиях современного цифрового производства. Авторы анализируют ограничения действующего стандарта ГОСТ 8.051, который не учитывает фактическую воспроизводимость технологического процесса (C_p), и сравнивают его с подходами, основанными на анализе измерительных систем (MSA, %GRR). На основе статистического моделирования методом Монте-карло выявлены зоны соотношения погрешности измерений к допуску ($\delta_{изм}/IT$), соответствующие различным уровням рисков ошибочных решений (α, β). Разработана блок-схема выбора СИ, интегрирующая оценку стабильности процесса, точности измерений и экономической целесообразности. Предложенный подход позволяет обоснованно выбирать измерительное оборудование, минимизировать операционные потери и обеспечивать баланс между затратами и требуемый уровень качества.

Ключевые слова: воспроизводимость процесса, индекс C_p , погрешность измерений, MSA, статистическое моделирование, риск контроля, ошибки первого и второго рода, средства измерений, управление качеством, цифровое производство.

**STANDARDIZATION OF MEASUREMENT ACCURACY
BASED ON STATISTICAL ESTIMATES OF REPRODUCIBILITY****D.A. Savelyeva, A.I. Soyko***Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI,
Kazan, savelevadasha2004@mail.ru*

Abstract. This paper examines the problem of establishing accuracy requirements for measuring instruments (MI) in the context of modern digital manufacturing. The authors analyze the limitations of the current GOST 8.051 standard, which does not take into account the actual reproducibility of the technological process (C_p), and compare it with approaches based on measurement system analysis (MSA, %GRR). Using Monte Carlo statistical modeling, we identified measurement error-to-tolerance ratios (δ_{meas}/IT) corresponding to different risk levels for erroneous decisions (α, β). A flowchart for selecting measuring instruments was developed, integrating the assessment of process stability, measurement accuracy, and economic feasibility. The proposed approach enables informed selection of measuring equipment, minimizing operational losses, and balancing costs with the required quality level.

Keywords: process reproducibility, C_p index, measurement error, MSA, statistical modeling, inspection risk, type I and type II errors, measuring instruments, quality management, digital manufacturing.

В современном производстве, где всё чаще внедряют цифровые технологии, возникает интересный конфликт. С одной стороны, чтобы продукция соответствовала стандартам качества, технологический процесс должен быть очень стабильным. Проверяется с помощью показателя C_p (воспроизводительность). Если $C_p \geq 1,33$, это значит, что процесс работает хорошо, и брака будет мало. С другой стороны, чтобы убедиться, что процесс действительно стабилен, нужно точно измерять параметры деталей. Но проблема в том, что измерительные приборы часто имеют погрешность, которая искажает реальную картину. Из-за этого возникают два риска: риск потребителя (α) и риск производителя (β). При риске потребителя бракуют годные детали, теряя деньги. При риске производителя пропускают брак, а клиент получает плохой продукт.

Кажется, что все логично, но на практике стандарты не учитывают реальные условия производства. Например, действующий ГОСТ 8.051-81, который регламентирует, что по-

грешность измерений ($\delta_{изм}$) должна быть в пределах допуска 20-35% от допуска на изготовление (IT) в зависимости от качества. Данный ГОСТ 8.051-81 определяет минимальные требования, которые не подходят для современного производства. В частности, допустимые значения погрешности средств измерений (СИ) должны учитывать, фактическую воспроизводимость технологического процесса (C_p). Примерное соотношение $\delta_{изм}/IT$ для процессов с различной воспроизводимостью (например, $C_p=0,8$ (низкая) и $C_p=1,67$ (высокая)) приводит к значительным расхождениям в уровне риска принятия решений.

В целях обеспечения конкурентоспособности и соответствия международным стандартам в производственной практике внедряются более строгие критерии, такие как требования AIAG MSA или модифицированные подходы, основанные на статистическом анализе воспроизводимости процесса (%GRR). Тем не менее, существующие методики носят разрозненный характер и не позволяют объективно оценить баланс между показателями точности технологического процесса (C_p), измерительной системы ($\delta_{изм}/IT$, %GRR), наблюдаемой воспроизводимостью (C_{p0}) и вероятностями ошибок первого (α) и второго (β) рода. Решение данной задачи позволит при выборе средств измерений обосновать затраты на измерительное оборудование, операционные потери, обусловленные ошибочными решениями, и требуемый уровень качества, выходя за рамки формального соблюдения нормативных требований. Также стоит отметить, что современные производственные системы требуют интеграции указанных методологий с приоритетом применения MSA для критических характеристик, что обеспечивает комплексный подход к управлению измерительными процессами.

В таблице 1 приведен сравнительный анализ ключевых требований двух нормативных документов: ГОСТ Р 51814.5 «Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов» и ГОСТ 8.051 «Государственная система обеспечения единства измерений. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500мм».

Таблица 1. «Сравнительная таблица подходов требований по ГОСТ Р 51814.5 и ГОСТ 8.051»

Критерий сравнения	ГОСТ Р 51814.5	ГОСТ 8.051
1. Цель документа	Получение заключения о приемлемости измерительного процесса при измерениях.	Установление допускаемых погрешностей измерений при приемочном контроле линейных размеров до 500мм.
2. Подход к точности измерений	Анализируется воспроизводимость и сходимость (GRR), а также их доля в допуске (%GRR).	Нормируется максимально допустимая погрешность измерения в зависимости от допуска на размер и качества.
3. Зависимость от допуска на изделие	Приемлемость измерений: <ul style="list-style-type: none"> Если %GRR < 10% - измерительная система приемлема. Если 10% ≤ %GRR ≤ 30% - система может быть приемлема в зависимости от важности применения и стоимости переделки. Если %GRR > 30% - система неприемлема. 	Погрешность измерения =20-35% от допуска.
4. Требования к точности СИ	Требуется провести исследование GRR, чтобы подтвердить пригодность СИ в конкретных условиях	Погрешность СИ должна не превышать допускаемую погрешность измерения по таблице
5. Связь с качеством	Используется верхняя и нижняя границы допуска на измеряемый параметр (USL-LSL)	Таблица: допускаемая погрешность измерения – номинальный размер +IT
6. Коэффициент настроенности процесса k	Коэффициент настроенности процесса k определяется по формуле: $k = ((USL+LSL)/2 - \bar{x}) / ((USL-LSL)/2)$. Данный коэффициент связывает индексы воспроизводимости C_p и C_{pk}	В пункте 1.3 сказано «Допускаемая погрешность измерения включает случайные и неучтенные систематические погрешности измерения.»

Цель исследования – разработать подход (блок-схему) к установлению оптимальных, экономически обоснованных требований к средствам измерений на основе статистического моделирования взаимосвязи показателей воспроизводимости процесса (C_p), погрешности измерений ($\delta_{изм}/IT$, %GRR) и вероятностей ошибочных решений (α , β).

Теоретические основы оценки погрешности измерений

Максимальная допустимая погрешность измерения представляет собой предельное значение погрешности, установленное нормативными документами или технической спецификацией для конкретного вида измерений. Выбор её величины напрямую влияет на достоверность результатов контроля и экономическую эффективность производственного процесса.

В рамках действующего стандарта ГОСТ 8.051-81 количественной характеристикой погрешности измерений выступает среднее квадратическое отклонение погрешности измерений ($\sigma_{изм}$). Качество самого технологического процесса оценивается через отношение поля допуска на изготовление ИТ к среднему квадратическому отклонению контролируемого параметра $\sigma_{тех}$. Данное соотношение тесно связано с индексом потенциальной способности (воспроизводимости) процесса C_p :

$$C_p = \frac{IT}{6 \cdot \sigma_{тех}}.$$

Наблюдаемая изменчивость процесса σ_0 , фиксируемая в ходе измерений, формируется под совместным влиянием двух составляющих: реальной изменчивостью технологического процесса $\sigma_{тех}$ и изменчивости измерительной системы $\sigma_{изм}$. Математически эта зависимость выражается соотношением:

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_{тех}^2 + \sigma_{изм}^2}, \quad (1)$$

Следовательно, наблюдаемый индекс воспроизводимости процесса определяется как:

$$C_{p0} = \frac{IT}{6 \cdot \sigma_0}. \quad (2)$$

Для конкретной оценки реальной способности процесса необходимо выполнить условия $C_{p0} \geq C_p$, что возможно лишь при достаточно малой доле измерительной погрешности в общей изменчивости.

Ключевым показателем пригодности измерительного процесса в рамках руководства MSA является %GRR – процентное соотношение, характеризующее вклад дисперсии измерений в общую дисперсию процесса. Показатель %GRR рассчитывается по формуле:

$$\%GRR = \frac{6 \cdot \sigma_{изм}}{IT} \cdot 100\%. \quad (3)$$

По ГОСТ Р 51814.5 требует проведения анализа повторяемости и воспроизводимости измерений. Приемлемость измерений оценивается по такому образу:

- Если %GRR < 10% - измерительная система приемлема.
- Если 10% <= %GRR <= 30% - система может быть приемлема в зависимости от важности применения и стоимости переделки.
- Если %GRR > 30% - система неприемлема.

Согласно Приложению 2 п.1 ГОСТ 8.051-81 «Влияние погрешности измерения при приемочном контроле оценивают параметрами:

m — число деталей в процентах от общего числа измеренных, имеющих размеры, выходящие за предельные и принятые в числе годных (неправильно принятые);

n — число деталей в процентах от общего числа измеренных, имеющих размеры, не превышающие предельные и забракованные (неправильно забракованные) ;

с — вероятностная величина выхода размера за предельные у неправильно принятых деталей.»

Таким образом:

- Ошибка I рода соответствует параметру m , то есть неправильный прием (забракованная деталь принята как годная)
- Ошибка II рода соответствует параметру n , неправильный брак (годная деталь признана браком).

Погрешность измерения, согласно п.1.3 ГОСТ 8.051-81 включает «случайные и неучтенные систематические погрешности измерения». Также стоит отметить, согласно п. 5.2.1 ГОСТ Р 50779.46-2012 «При анализе воспроизводимости обычно используют данные, приведенные на контрольной карте. Если на контрольной карте приведены линии ослабленного контроля или измененные линии контроля, реальное стандартное отклонение процесса будет больше, чем стандартное отклонение, полученное по данным контрольной карты со стандартными линиями контроля. Указанные особенности влияют на опорный интервал, поэтому важно, чтобы они были указаны при анализе воспроизводимости процесса.» и п.6.1 «При анализе пригодности процесса: - должны быть установлены требования к неопределенности системы измерений;». Можно сказать, что неконтролируемая погрешность измерения искажает индексы C_p , C_{pk} , делая их завышенными или заниженными в зависимости от характера смещения.

Анализ результатов статистического моделирования и обоснование требований к точности средств измерений

На основании проведенного статистического моделирования методом Монте-Карло ($N = 10^6$ деталей) выявлены четкие закономерности в взаимосвязи между стабильностью технологического процесса, точностью средств измерений и вероятностями ошибок контроля. Анализ показал, что выбор средств измерений должен определяться не только нормативными требованиями, но и реальным уровнем стабильности процесса, выраженным через индекс воспроизводимости C_p .

В результате статистического моделирования выделены четыре зоны отношения $\delta_{изм}/IT$, характеризующиеся различными уровнями суммарной ошибки контроля (для процесса с $C_p = 1,33$). Эти зоны отчетливо видны на представленном графике «Зависимость наблюдаемого C_p от δ/IT » (рисунок 1).

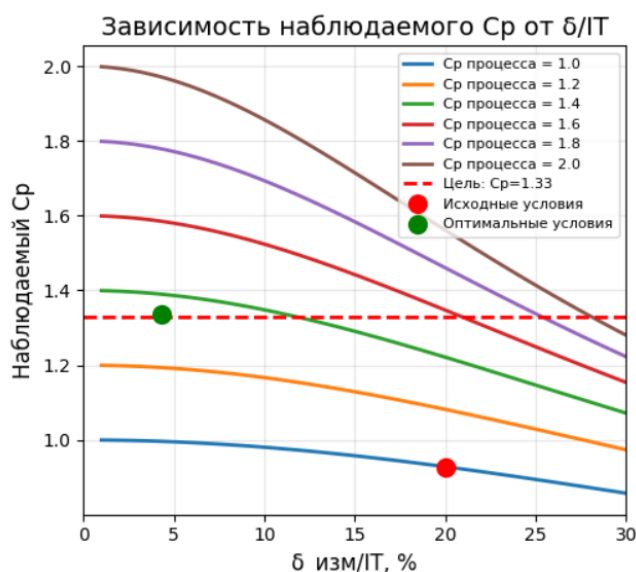


Рис. 1. Зависимость наблюдаемого C_p от δ/IT

Анализируя график на рисунке 1, выделяемые четыре зоны можно подробно описать:

1) Зона $\delta_{изм}/IT > 20\%$ – зона высоких рисков. На графике эта зона расположена в правой части. Погрешность измерений поглощает значительную часть допуска, искажая реальную картину качества. Экономически нецелесообразно применять высокоточные СИ без предварительного улучшения технологического процесса.

2) Зона $\delta_{изм}/IT = 10-20\%$ – зона баланса точности и стоимости. На графике эта зона соответствует участку от 10% до 20%. Приемлема для большинства машиностроительных деталей.

3) Зона $\delta_{изм}/IT = 5-10\%$ – зона точных измерений критических параметров. На графике эта зона соответствует участку от 5% до 10%. Требует применения дорогих СИ и квалифицированного персонала.

4) Зона $\delta_{изм}/IT < 5\%$ – зона требований MSA. На графике эта зона расположена слева до 5%. Предполагает использование высокоточных СИ.

График наглядно демонстрирует, как с ростом относительной погрешности измерений ($\delta_{изм}/IT$) уменьшается наблюдаемый индекс воспроизводимости C_p . Для каждого значения C_p процесса можно определить критическое значение $\delta_{изм}/IT$, при котором наблюдаемый C_p падает ниже целевого значения 1,33 (красная пунктирная линия). Зеленая точка «Оптимальные условия» соответствует оптимальному соотношению между точностью измерений и стоимостью контроля, обеспечивая минимальные ошибки при разумных затратах на измерительное оборудование.

Блок-схема оценки стабильности процесса и выбора СИ

Для практического применения результатов исследования разработана блок-схема (рис. 1), позволяющая систематизировать процесс выбора средств измерений с учетом стабильности технологического процесса.

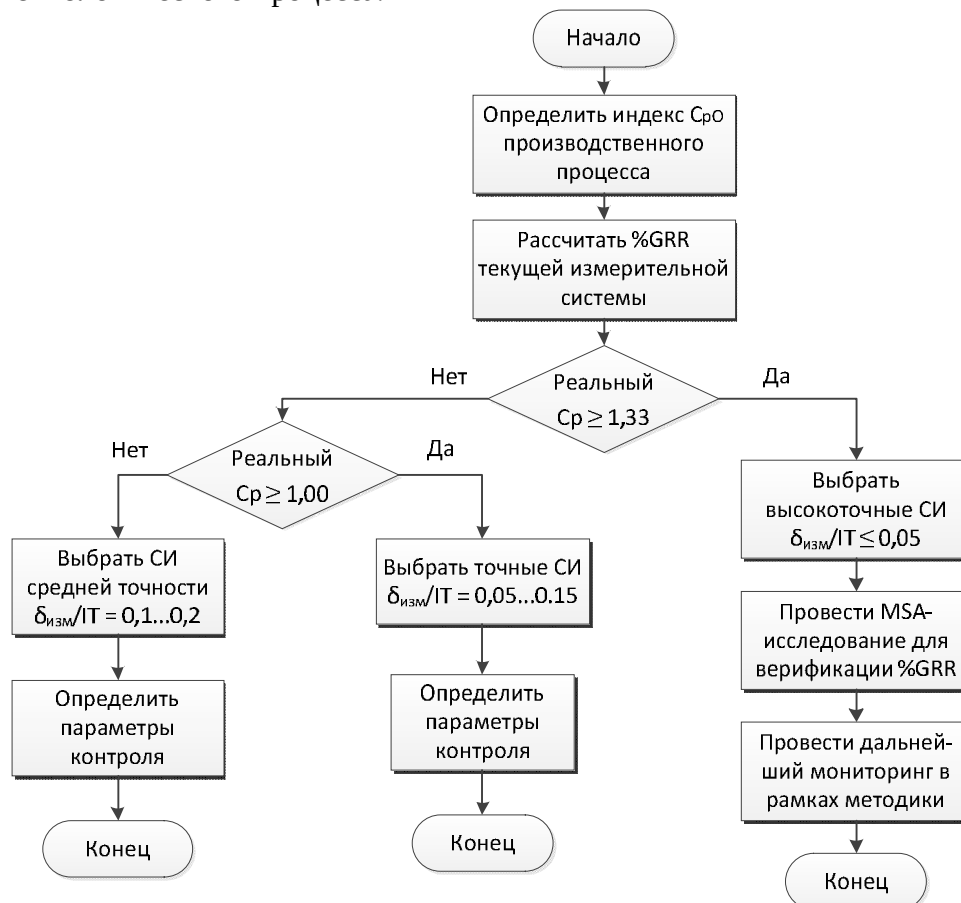


Рис. 2. Блок-схема оценки стабильности процесса и выбора СИ

Эта схема представляет собой замкнутый цикл улучшения, где результаты оценки процесса (стабильность, C_p) напрямую влияют на действия по его корректировке и на требования к точности измерительной системы. Также стоит отметить, что блок-схема является не просто алгоритмом, а комплексной системой принятия метрологических решений. Она предоставляет производственному персоналу структурированный и обоснованный инструмент для диагностики состояния процесса и измерительной системы, определения приоритетов (что улучшить в первую очередь: процесс или средства контроля), количественного обоснования требований к точности оборудования, постоянного совершенствования через замыкание обратной связи.

Заключение

Важно отметить различие подходов ГОСТ 8.051-81 И MSA. ГОСТ устанавливает предельно допустимые значения погрешности, обеспечивая базовый уровень достоверности приёмочного контроля. Руководство MSA, напротив, ориентировано на управление процессом в реальном времени. Также представленная методология позволяет инженерам-технологам и метрологам принимать обоснованные решения при выборе средств измерений, оценивать риск контроля и планировать мероприятия по совершенствованию технологических процессов, обеспечивая баланс между стоимостью измерительного оборудования и требуемым уровнем качества продукции. Внедрение подхода с блок-схемой позволяет перейти от формального соблюдения нормативов к активному, экономически эффективному управлению качеством на основе достоверных измерительных данных, что является обязательным условием для конкурентоспособности современного цифрового производства.

Библиографический список

1. ГОСТ 8.051-81 ГСИ. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм. – Введ. 1982-01-01. – Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2004.
2. ГОСТ Р 51814.5-2005 Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов. – Введ. 2005-07-01. – М.: Стандартинформ, 2005.
3. ГОСТ Р 50779.46-2012. Статистические методы. Управление процессами. Часть 4. Оценка показателей воспроизводимости и пригодности процесса. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 ноября 2012.

УДК 339.142; ГРНТИ 06.71.

МАРКИРОВКА ТОВАРА КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

Л.Н. Тохтиева, Н.И. Енацкая

*Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова,
Российская Федерация, Москва, Enatskay.NI@rea.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются понятие маркировки товара, общие и специальные требования к нанесению информации на упаковку на примере свежей и переработанной плодоовощной продукции. Представлены образцы разработанных дизайн-макетов с обязательной маркировкой на пищевую продукцию, использование которых минимизирует риски, сокращает появление бракованного и контрафактного товара, обеспечивает безопасность продукции и уменьшает количество претензий и штрафов организаций и поставщиков. Все это способствует совершенствованию бизнес-процессов и в дальнейшем позволит более эффективно использовать уже существующую цифровую систему «Честный знак» для информационной поддержки и контроля.

Ключевые слова: маркировка пищевой продукции, бизнес-процессы, проектирование, оптимизация, этикетка.

PRODUCT LABELING AS A QUALITY MANAGEMENT TOOL

L.N. Tokhtieva, N.I. Enatskaya
Plekhanov Russian University of Economics,
Russia, Moscow, Enatskay.NI@rea.ru

The summary. The paper discusses the concept of product labeling, as well as general and specific requirements for displaying information on packaging, using fresh and processed fruits and vegetables as an example. The paper presents samples of designed layout with mandatory labeling on food products, the use of which minimizes risks, reduces the appearance of defective and counterfeit goods, ensures product safety and reduces the number of claims and fines from organizations and suppliers. All of this contributes to the improvement of business processes and will allow for more effective use of the existing digital system "Honest Sign" for information support and control in the future.

Keywords: food product labeling, business processes, design, optimization, and labeling.

Введение. В настоящее время маркировка товаров стала неотъемлемой частью деятельности организаций как в России, так и в странах Таможенного союза. Для пищевой продукции разработаны и реализуются единые обязательные требования по маркировке, регулирующие вопросы безопасности и достоверности информации [1, 2].

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью управления качеством и безопасностью пищевых продуктов для населения. Прежде всего в вопросах прозрачности, контролируемости и эффективности цепочки поставок, что в современных условиях невозможно без внедрения инструментов идентификации и прослеживания продукции [3]. Это особенно важно для повышения доверия со стороны потребителей. Отметим, что в Российской Федерации с 2018 года действует обязательная система маркировки товаров в системе «Честный знак» [4, 5]. Ожидается, что с 2026 года перечень продукции, подлежащей обязательной маркировке средствами идентификации (код Data Matrix), будет расширен, в том числе, за счет некоторых видов кондитерских изделий, напитков и консервированных плодоовощных товаров. Однако, в данный список не планируется включение свежих, очищенных и замороженных плодоовощных продуктов. Возможно поэтому, на рынке наблюдается значительное разнообразие вариантов маркировки такой продукции, что создает путаницу среди потребителей и юридических лиц, порождает вопросы о безопасности товаров, вызывает случаи изъятия продукции, рекламации и штрафные санкции [6].

Целью настоящего исследования является проектирование дизайн-макетов маркировки для свежей и переработанной плодоовощной продукции, предназначенных для использования производителями и поставщиками, с учётом действующих законодательных требований, стандартов пищевой продукции и интересов участников рынка.

В данной работе использованы методы исследования: теоретический анализ и структурирование нормативно-правовой документации, реферирование научной и справочной литературы. Определение и стандартизация обязательных требований к маркировке плодоовощной группы товаров, в соответствие с технической документацией и стандартами на пищевую продукцию, потребностями производителя/поставщиков и потребителей; верификация общей и дополнительной информации, размещенной на упаковке товаров; экспертиза и оценка эффективности предложенных дизайн-макетов полученных на основе анализа действующих реестров и документов, полученных с официальных сайтов Росаккредитации и Росстандарта [7, 8].

Информация о финансировании. Работа выполнена в рамках договора на оказание услуг по проектированию маркировки товара как способа совершенствования процессов управления качеством от 12.11.2025 № 125-Д между РЭУ им. Г. В. Плеханова (Исполнитель) и ООО «МУЛЬТИС» (Заказчик).

Благодарности. Авторы выражают благодарность генеральному директору ООО «МУЛЬТИС» Братчикову Юрию Николаевичу за поддержку, предоставление технической

документации и информации о маркировке на упаковках и этикетках плодоовощной продукции.

Основная часть. Проектирование маркировки товара следует рассматривать как инструмент совершенствования бизнес-процессов в организации. Согласно Техническому регламенту, маркировка пищевой продукции представляет собой информацию, нанесённую в форме надписей, рисунков, знаков, символов или их сочетаний на потребительскую либо транспортную упаковку, а также на другие носители информации, которые прикрепляются или помещаются в упаковку продукции, либо прилагаются к ней [2].

Выпуск и реализация пищевой продукции на рынке возможны только при условии наличия маркировки, отвечающей требованиям действующих нормативно-правовых и технических документов как Российской Федерации, так и государств Таможенного союза [2, 9]. В результате подробного изучения и анализа документов были структурированы основные требования к маркировке товаров исследуемой группы, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1. Обязательные требования к маркировке пищевой продукции

Технический регламент Таможенного союза 022/2011	ГОСТ Р 51074-2003
<p>Область применения: распространяется на единой таможенной территории Таможенного союза (ТС). Устанавливает требования к пищевой продукции в части ее маркировки в целях предупреждения действий, вводящих в заблуждение потребителей на достоверную информацию. (ст. 1).</p> <p>Информация предоставляется на русском языке и на государственном(ых) языке(ах) государства – членов ТС (пункт 2 ч. 4.1 ст. 4).</p>	<p>Область применения: распространяется на пищевые продукты, фасованные в потребительскую тару, реализуемые на территории Российской Федерации в оптовой и розничной торговле, поставляемые предприятиям общественного питания, школам, детским, лечебным учреждениям (пункт 1)</p>
<p>Требования к наименованию пищевой продукции: (физические свойства и (или) специальные способы обработки) пункт 3 ч. 4.3 ст.4</p>	<p>Наименование пищевого продукта (пункт 3.5.1 и пункт 4.13.2)</p>
<p>Наименование и место нахождения изготовителя (уполномоченного изготовителем лица; организации-импортера или индивидуального предпринимателя-изготовителя (импортера) пищевой продукции (подпункт 7 пункт 1 ч. 4.1 ст.4).</p> <p>Место нахождения изготовителя определяется местом государственной регистрации организации или индивидуального предпринимателя (пункт 1 ч. 4.8 ст. 4). Информацию о наименовании и месте нахождения изготовителя пищевой продукции, поставляемой из третьих стран, допускается указывать буквами латинского алфавита и арабскими цифрами или на государственном(ых) языке(ах) страны по месту нахождения изготовителя пищевой продукции при условии указания наименования страны на русском языке (пункт 3 ч 4.8 ст. 4).</p>	<p>Наименование и местонахождение изготовителя [юридический адрес, включая страну, и, при несовпадении с юридическим адресом адрес(а) производств(а)] и организации в Российской Федерации, уполномоченной изготовителем на принятие претензий от потребителей на ее территории (при наличии) (пункт 3.5.2)</p>
<p>Состав пищевой продукции не требуется указывать в отношении: свежих фруктов (включая ягоды) и овощей (включая картофель); пищевой продукции, состоящей из одного компонента (подпункты 1 и 3 пункт 7 ч. 4.4 ст. 4).</p> <p>Количество пищевой продукции указывается в единицах массы (граммах или килограммах) или счета (штуках) (подпункт 3 пункт 1 ч. 4.1. ст. 4 и пункт 1 ч. 4.5 ст. 4).</p> <p>Допускается одновременное использование двух величин, например, масса и количество штук, масса и объем (пункт 2 ч. 4.5 ст. 4)</p>	<p>Масса нетто, или количество продукта (пункт 3.5.4)</p> <p>Товарный сорт (при наличии) (пункт 4.13.2)</p>

Технический регламент Таможенного союза 022/2011	ГОСТ Р 51074-2003
Рекомендации и (или) ограничения по использованию , в том числе приготовлению пищевой продукции в случае, если ее использование без данных может привести к снижению или утрате вкусовых свойств (подпункт 8 пункт 1 ч. 4.2 ст. 4).	Рекомендации по приготовлению продукта (при необходимости) (пункт 3.5.8, пункт 4.13.2)
Условия хранения пищевой продукции установлены изготовителем или техническими регламентами (указываются условия хранения после вскрытия упаковки) (подпункт 6 пункт 1 ч. 4.1 ст. 4)	Условия хранения для продуктов, требующих специальных условий хранения (<i>пониженной температуры, определенных влажности окружающего воздуха и светового режима и других</i>) (пункт 3.5.9, пункт 4.13.2)
Дата изготовления пищевой продукции (дата производства) (подпункт 4 пункт 1 ч. 4.1 ст. 4) Указывается число, месяц, год при сроке годности от 72 часов до трех месяцев (подпункт 2 пункт 1 ч. 4.6 ст. 4) Указывается месяц, года или число, месяц, год при сроке годности три месяца и более; (подпункт 3 пункт 1 ч. 4.6 ст. 4). Вместо слов «дата изготовления» могут быть установлены иные понятия, например год урожая сельскохозяйственных культур (пункт 4 ч. 4.6 ст. 4)	Дата изготовления и дата упаковывания указывают словами: «изготовлен(о) ... (дата)»; «упакован(о) ... (дата)». Если упаковщиком является изготовитель, который одновременно изготавливает и упаковывает пищевой продукт, или изготовителем в соответствии с пунктом 3.5.2 считается упаковщик, то дату изготовления и упаковывания указывают словами: «изготовлен(о) и упакован(о) ... (дата)» (пункт 3.5.13, пункт 4.13.2)
Срок годности пищевой продукции (подпункт 5 пункт 1 ч. 4.1 ст. 4) «годен до» с указанием числа, месяца, года при сроке годности от 72 часов до трех месяцев (подпункт 2 пункт 1 ч. 4.7 ст. 4) «годен до конца» с указанием месяца, года или «годен до» с указанием числа, месяца, года при сроке ее годности не менее месяцев (подпункт 3 пункт 1 ч. 4.7 ст. 4)	Срок годности исчисляется с даты изготовления (пункт 3.5.10) Срок хранения (пункт 3.5.11, пункт 4.13.2) Срок реализации указывают: «реализовать до ... (час, дата)» или «реализовать в течение ... (часов, суток)» (пункт 3.5.12) Срок годности, срок хранения и/или срок реализации на потребительскую тару нарезанных и/или фасованных пищевых продуктов наносит упаковщик с учетом сроков, установленных изготовителем (пункт 3.5.14)
В маркировке упакованной пищевой продукции могут быть указаны сведения о документе , в соответствии с которым произведена и может быть идентифицирована пищевая продукция (пункт 3 ч. 4.1 ст. 4)	Товарный знак изготовителя (при наличии) (пункт 3.5.3) Обозначение документа, в соответствии с которым изготовлен и может быть идентифицирован продукт (допускается наносить без указания года утверждения). Для импортных продуктов допускается не указывать (пункт 3.5.15, пункт 4.13.2)
Единый знак обращения продукции на рынке государств – членов ТС (подпункт 11 пункт 1 ч. 4.1 ст. 4)	Информация о подтверждении соответствия пищевых продуктов. Продукт может сопровождаться, рекламной информацией , может наноситься штриховой код (пункт 3.5.16, пункт 3.6)

Источник: составлено авторами [Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден.].


В результате изучения и анализа технической документации, информации на этикетках широкого ассортимента плодоовощной продукции, находящейся в обороте, были разработаны дизайн-макеты, образцы которых представлены в таблице 2 и таблице 3 [10].

Таблица 2. Дизайн-макеты маркировки плодоовощной продукции – овощи замороженные

Варианты маркировки замороженной продукции по видам технических условий	
национальный стандарт	технические условия изготовителя
<p>Горошек зеленый быстрозамороженный ГОСТ Р 54683-2011*</p> <p>Дата выработки: 23.10.2025* Употребить до: 23.10.2026* Страна происхождения: Россия Изготовитель: ООО «КАНТАРЕЛЛА» РОССИЯ, Ивановская обл, Лежневский р-н, п Лежнево Юр. адрес: 155120, Россия, Ивановская обл., Лежневский м.р-н, с.п. Лежневское, тер. Северная промышленная зона, ЗД. 3 Рекомендации по использованию: Быстрозамороженные овощи применяют для приготовления различных блюд: закусок, гарниров, обеденных блюд без предварительного размораживания. Быстрозамороженные овощи можно употреблять после размораживания непосредственно в пищу. Размораживание: в бытовых холодильниках от 2,5 до 5 ч в зависимости от размеров овощей - при температуре 6°С-8°С, при температуре окружающей среды - 2-3 ч до полного размягчения. Масса нетто: 10 кг* Условия и периоды хранения: при t минус 18°С и ОВВ 90-95%, не более 18 мес допускается кратковременное хранение при t минус (12±1) °С не более 30 сут. при t минус 8 °С не более 7 сут. Повторное замораживание не допускается</p> 	<p>Горошек зеленый быстрозамороженный ТУ 9160-079-46395954-14*</p> <p>Дата изготовления и упаковывания: 09.06.2025* Срок годности: 24 месяца* Партия № 0069 Страна происхождения: Россия Изготовитель: ООО ТОРГОВЫЙ ДОМ «АЙСГРУПП» 115088, Россия, г.Москва, Муниципальный округ Южнопортовый вн. тер. г., ул Шарикоподшипниковская, д. 13, стр. 3 Адрес производства: 142500, Россия, обл Московская, г Павловский Посад, ул. Интернациональная, д. 34А Рекомендации по использованию: перед использованием овощи рекомендуется промыть. Необходимое количество продукта не размораживая, готовить по выбранной рецептуре так же, как и свежие овощи Масса нетто: 10 кг* Хранить при t минус 18°С и ОВВ не более 95% 24 мес. с даты изготовления Размороженный продукт повторно не замораживать!</p> 
Примечание – * Данные со звездочкой указывают шрифтом размером строчных букв не меньше 2 мм, остальные – не меньше 0,8 мм	

Источник: составлено авторами [2, 9, 10, 11, 13, 14,15].

Таблица 3. Дизайн-макеты маркировки плодоовощной продукции – плоды свежие и овощи очищенные

Варианты маркировки фруктов свежих и овощей очищенных по видам технических условий	
межгосударственный стандарту	технические условия изготовителя
<p>Яблоки свежие ГОСТ 34314-2017*</p> <p>Гренни Смит Высший сорт Урожай 2025 г.* Дата упаковывания: 28.11.2025* Годен до: 27.12.2025* Страна происхождения: РОССИЯ Производитель: ООО «АНЕТФРУТ» 361533, РОССИЯ, Кабардино-Балкарская Респ, Баксан г, Убыкская ул, дом б/н., контур № 333, кадастровый номер 07:01:2400000605 кадастровый номер 07:01:2400000606, Юр. адрес: 361520, Россия, Кабардино-Балкарская республика, Баксанский м. р-н, с. Исламей, с.п. Исламей, ул Красноармейская, д. 275 Вес нетто: 13 кг* Масса плодов св. 135,0 до 300,0 грамм включ. Хранить при t от + 2°С до + 4 °С и ОВВ от 90% до 95%</p> 	<p>Морковь свежая очищенная* в вакуумной упаковке ТУ 10.39.00-003-64199186-2017</p> <p>Изготовлено и упаковано: 10.12.2025* Годен до 15.12.2025* Страна происхождения: Россия Изготовитель: ООО «ЭЛИС ГАРДЕН» 188505, Россия, Ленинградская обл., Ломоносовский район, МО «Аннинское сельское поселение», д. Большие Томики, ул. Срединная, д. 14, Юр. адрес: 197183, Россия, г. Санкт-Петербург, пер. Шишмарёвский, 4, Литер А Рекомендации по использованию: Морковь готова к употреблению в свежем виде, может использоваться для приготовления салатов, гарниров, первых и вторых блюд. Перед употреблением при необходимости промойте в проточной воде. Масса нетто: 5 кг* Условия хранения: при t от +2°С до +7°С и ОВВ 90-95% После вскрытия упаковки морковь промыть и хранить в холодной воде не более 2 часов</p> 
Примечание – * Данные со звездочкой указывают шрифтом размером строчных букв не меньше 2 мм, остальные – не меньше 0,8 мм	

Источник: составлено авторами [2, 9, 10, 11, 13, 14, 15].

Выводы. В ходе работы были изучены и проанализированы законодательные акты, техническая документация, методические рекомендации Роспотребнадзора и технические задания к контрактам на поставку продуктов питания для нужд социальных учреждений г. Москвы. Выявлено, что маркировка пищевой продукции в виде надписей, рисунков, знаков, символов и обозначений и (или) их комбинаций на упаковке, является важным элементом в построении бизнес-процессов современной организации, обеспечивающих прозрачность и эффективность. Реализация единых обязательных требований к маркировке способствует повышению безопасности и качества продуктов питания для граждан страны. Процесс приемки товаров начинается с проверки сохранности груза, его упаковки и соответствия маркировки установленным требованиям технического задания заказчика и предложенных образцов дизайн-макетов маркировки, что позволяет снизить вероятность ошибок и повысить уровень прослеживаемости продукции.

Считаем целесообразным продолжить работу по проектированию маркировки других групп товаров, а также внедрять разработанные рекомендации в регионах России для обеспечения предсказуемости, контролируемости, прослеживаемости и безопасности оборота продовольственных товаров на современном рынке.

Библиографический список

1. Российская Федерация. Законы. О качестве и безопасности пищевых продуктов : Федер. Закон № 29-ФЗ : принят Государственной Думой 01.12.1999 : одобрен Советом Федерации 23.12.1999 : послед. ред. // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901751351> (дата обращения: 10.12.2025).
2. Пищевая продукция в части ее маркировки : Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 022/2011 : утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 09.12.2011 № 881 : послед. ред. // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902320347> (дата обращения: 10.12.2025).
3. Алексеева, А. В. Идентификация и прослеживаемость продукции сельскохозяйственного назначения при поставках на рынок ЕАЭС А. В. Алексеева, К. Д. Привалов // Вестник Евразийской науки. – 2024. – Т. 16. – № S1. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13024552> (дата обращения: 28.11.2025). – Режим доступа: Науч. электрон. б-ка eLIBRARY.RU.
4. Квятковский, Д. В. Влияние внедрения системы маркировки ЕГАИС «Честный знак» на оборот контрафакта в России // Юридическая наука. – 2023. – № 11. – С. 236-239.
5. Честныйзнак. рф : государственная система цифровой маркировки : офиц. сайт гос. системы маркировки и прослеживаемости Честный ЗНАК. – Москва, 2025. – URL: <https://честныйзнак.рф> (дата обращения: 28.11.2025).
6. Долганова, Я. А. Роль маркировки товаров в борьбе с контрафактной продукцией / Я. А. Долганова, Д. В. Пашегорова // ИПЭФ. – 2023. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-markirovki-tovarov-v-borbe-s-kontrafaktnoy-produktsiey> (дата обращения: 01.02.2026).
7. Стандарты и регламенты // Росстандарт: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии : офиц. сайт. – URL: <https://www.rst.gov.ru> (дата обращения: 10.12.2025).
8. Единый реестр сертификатов и деклараций о соответствии // Росаккредитация: Федеральная служба по аккредитации : офиц. сайт. – URL: <https://pub.fsa.gov.ru/rds/declaration> (дата обращения: 10.12.2025).
9. ГОСТ Р 51074-2003. Продукты пищевые. Информация для потребителя. Общие требования: нац. стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие постановлением Госстандарта России от 29.12.2003 № 401-ст : введен впервые : дата введения 2005-07-01 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200035978> (дата обращения: 10.12.2025).
10. Договор на оказание услуг по проектированию маркировки товара как способа совершенствования процессов управления качеством от 12.11.2025 № 125-Д заключенный между РЭУ им. Г.В. Плеханова (Исполнитель) и ООО «МУЛЬТИС» (Заказчик).
11. ГОСТ Р 54683-2011. Овощи быстрозамороженные и их смеси. Технические условия: нац. стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 13.12.2011 № 842-ст : введен впервые : дата введения 2013-01-01 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093150> (дата обращения: 10.12.2025).
12. ГОСТ 34314-2017. Яблоки свежие, реализуемые в розничной торговле. Технические условия: Межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 15.12.2017 № 2006-ст : введен взамен ГОСТ Р 54697-2011 : дата введения 2018-07-01 // Кодекс :

электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/556348922> (дата обращения: 10.12.2025).

13. МР 2.3.6.0233-21. Методические рекомендации к организации общественного питания населения: 2.3.6. Предприятия общественного питания : утверждены Руководителем Роспотребнадзора, Главным гос. сан. врачом Российской Федерации А. Ю. Поповой 02.03.2021 : введены впервые // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573778840> (дата обращения: 10.12.2025).

14. О безопасности упаковки : Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 005/2011 : утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 16.08.2011 № 769 : послед. ред. // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902299529> (дата обращения: 10.12.2025).

15. ГОСТ 14192-96. Маркировка грузов: межгосударственный стандарт : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 04.10.1966 № 10) : введен впервые : дата введения 1998-01-01 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200006710> (дата обращения: 10.12.2025).

УДК 339.142; ГРНТИ 06.71.

КАТЕГОРИЙНЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ В ЗАКУПКАХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В.Е. Петрова

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,
г.Казань, lera160502@mail.ru*

Аннотация. В статье рассматриваются особенности применения категорийного менеджмента в закупках производственных предприятий в условиях усиления ценовой конкуренции и нестабильности внешней среды. Обосновано противоречие между ориентацией на минимизацию закупочных затрат и необходимостью обеспечения непрерывности производственного процесса и стабильного качества закупаемых ресурсов. Выявлены ключевые проблемы внедрения категорийного подхода, включая доминирование ценового критерия, отсутствие дифференцированного управления категориями и недостаточную интеграцию с управлением качеством и рисками. Предложена матричная модель классификации закупочных категорий, основанная на сочетании экономической значимости и степени влияния категории на непрерывность производственного процесса.

Ключевые слова: категорийный менеджмент, закупочная деятельность, производственные предприятия, классификация закупочных категорий, управление качеством, риск-ориентированный подход, непрерывность производства.

CATEGORY MANAGEMENT IN ENTERPRISE PROCUREMENT

V.E. Petrova

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI,
Kazan, lera160502@mail.ru*

The summary. This article examines the application of category management in procurement at manufacturing enterprises in the context of increasing price competition and environmental instability. The contradiction between the focus on minimizing procurement costs and the need to ensure production continuity and the consistent quality of purchased resources is substantiated. Key challenges in implementing a category approach are identified, including the dominance of price criteria, the lack of differentiated category management, and insufficient integration with quality and risk management. A matrix model for classifying purchasing categories is proposed, based on a combination of economic significance and the degree of category impact on production continuity.

Keywords: category management, procurement activities, manufacturing enterprises, purchasing category classification, quality management, risk-based approach, production continuity.

В условиях высокой конкуренции и нестабильности внешней среды закупочная деятельность производственных предприятий приобретает стратегическое значение, поскольку определяет устойчивость производственного процесса, уровень затрат и качество выпускаемой продукции. С одной стороны, производственные предприятия ориентированы на минимизацию закупочных затрат на предприятия, с другой стороны, это может формировать рис-

ки, например, некачественного сырья или срыва поставки закупочной продукции, что может привести к повышению совокупных издержек и срыву производства. Возникает противоречие между стремлением предприятий к минимизации закупочных затрат и необходимостью обеспечения непрерывности производственного процесса и стабильного качества закупаемых ресурсов.

Категорийный менеджмент традиционно рассматривается как инструмент структурирования ассортимента и управления группами товаров, объединенных общими свойствами, потребителями и целями управления. Категорийный менеджмент в закупках - это стратегический подход к управлению закупками, который фокусируется на категориях товаров и услуг, а не на отдельных закупках. Вместо того чтобы рассматривать каждую покупку изолированно, категорийный менеджмент объединяет схожие товары и услуги в категории и разрабатывает для каждой категории отдельную стратегию закупок. Это позволяет оптимизировать весь процесс закупок, достигая синергетического эффекта и значительной экономии. В закупочной функции категорийный подход предполагает выделение категорий закупаемых ресурсов и разработку стратегии управления каждой категорией на основе ее роли для организации, условий рынка поставщиков и требований к качеству. Специфика производственных предприятий заключается в том, что объектом управления являются не товары для продажи, а ресурсы, обеспечивающие выпуск продукции: сырье, комплектующие, материалы, оборудование, услуги производственной инфраструктуры и логистики. Следовательно, при разделении на категории ключевым становится не потребительский спрос, а вклад категории в непрерывность производственного процесса и достижение целевых показателей качества. В разработке категорийного подхода для производственной организации необходимо отойти от маркетинговой концепции из-за того, что потребитель находится внутри самого предприятия. Теоретической основой разработки нового категорийного подхода служат:

- концепция общих издержек (total cost of ownership),
- стратегическое планирование;
- проектное управление [1, с.57].

Ключевые проблемы внедрения категорийного менеджмента на производственных предприятиях

Несмотря на потенциальную эффективность категорийного подхода, его внедрение в закупочную деятельность производственных предприятий сопровождается рядом системных проблем, обусловленных как организационными, так и методическими факторами.

Одной из них является преобладание ценового критерия и ориентация на краткосрочную экономию. Во многих организациях результативность закупочной функции оценивается преимущественно по показателям снижения закупочной цены, полученной экономии относительно плановых или базовых показателей. Такая система мотивации формирует у специалистов по закупкам приоритет краткосрочного снижения цены перед долгосрочной устойчивостью поставок и обеспечением стабильного качества. Таким образом, при выборе поставщиков недооцениваются риски несоответствия сырья и материалов установленным требованиям, колебания сроков поставки, нестабильность логистических цепочек и финансовая устойчивость контрагентов. Экономия на закупочной цене может быть увеличена ростом затрат на входной контроль, дополнительную сортировку, переработку продукции, возвраты и рекламации. Кроме того, при сбоях поставок возможны простои оборудования и персонала, что приводит к увеличению условно-постоянных расходов и срыву контрактных обязательств перед потребителями. Таким образом, ориентация исключительно на минимизацию цены без оценки совокупных издержек и производственных рисков искажает управленческие решения в сфере закупок.

Второй проблемой является отсутствие дифференцированного управления категориями. На предприятиях нередко применяется унифицированный подход к управлению всеми

закупаемыми ресурсами, то есть устанавливаются единые процедуры согласования, одинаковые критерии отбора поставщиков, стандартные формы договоров и типовые регламенты взаимодействия. Такой подход упрощает администрирование закупочной функции, однако игнорирует различия между категориями по их экономической значимости и степени влияния на непрерывность производственного процесса. Ресурсы, способные при дефиците или несоответствии вызвать остановку производства, зачастую управляются по тем же принципам, что и второстепенные материалы или хозяйственные товары, отсутствие приоритизации приводит к распылению управленческого внимания и недостаточной концентрации ресурсов на критичных позициях. В результате стратегически значимые категории не получают должного уровня анализа рынка поставщиков, оценки рисков, планирования альтернатив и формирования страховых запасов. Таким образом, недифференцированный подход снижает устойчивость производственной системы и ограничивает возможности стратегического управления закупками.

Третьей проблемой является недостаточная интеграция категорийного подхода с управлением качеством и рисками, ведь даже при наличии формализованных процедур риск-ориентированного управления риски в закупочной деятельности могут рассматриваться обособленно от категорийной структуры. Реестры рисков формируются на уровне функции закупок, без учета различий между категориями по их критичности и экономическому влиянию. В результате мероприятия по управлению рисками носят общий характер и не обеспечивают концентрации усилий в зонах максимальной угрозы. Между тем именно сочетание высокой доли затрат и высокой степени влияния на непрерывность производства формирует категории, требующие усиленного контроля и стратегического взаимодействия с поставщиками, а отсутствие интеграции категорийного менеджмента и риск-менеджмента ограничивает возможности управления качествомкупаемых ресурсов и не позволяет перейти от устранения последствий к предупреждению рисков.

Четвертой проблемой является организационные и информационные ограничения. Существенным препятствием внедрения категорийного менеджмента являются организационные ограничения, например, закупочная функция, производство и служба качества часто действуют разобщенно, что затрудняет формирование единой оценки критичности категорий и реальных последствий сбоев поставок. Отсутствие взаимодействия снижает полноту информации, используемой при принятии решений. Дополнительной проблемой является недостаток достоверных данных о совокупных потерях, связанных с несоответствиями качества и простоями. В управленческой отчетности, как правило, фиксируется только экономия на закупочной цене, тогда как косвенные потери остаются вне зоны анализа. Также нередко отсутствуют единые справочники номенклатуры и четко структурированная классификациякупаемых ресурсов, что затрудняет выделение категорий и проведение аналитики.

Внедрение категорийного менеджмента требует специфических компетенций, таких как анализа рынка поставщиков, оценки рисков, стратегического планирования, что предполагает развитие профессиональных навыков специалистов по закупкам.

Таким образом, основная управленческая проблема заключается в том, что категорийный менеджмент либо не применяется, либо используется ограниченно - преимущественно как инструмент снижения закупочной цены, без системного учета экономической значимости категорий и их влияния на непрерывность производственного процесса. Это снижает устойчивость предприятия и препятствует формированию риск-ориентированной модели управления закупками.

Модель классификации закупочных категорий для производственных предприятий

Для устранения перечисленных выше проблем целесообразно использовать классификацию, отражающую двойственную природу закупок в производстве. Мной выбраны две: экономическая и степень влияния на непрерывность производственного процесса, предлагается матричная модель, основанная на двух критериях:

1. Экономическая значимость категории - доля категории в суммарных закупочных затратах или влияние на себестоимость.
2. Степень влияния категории на непрерывность производственного процесса - возможность остановки или существенного нарушения производственного цикла при дефиците, срыве сроков или несоответствии качества.

На основе сочетания этих критериев формируются четыре группы категорий (табл. 1).

Таблица 1. Матрица классификации закупочных категорий

Экономическая значимость / Влияние на непрерывность производства	Низкая степень влияния	Высокая степень влияния
Низкая доля затрат	Поддерживающие категории	Обеспечивающие категории
Высокая доля затрат	Затратообразующие категории	Ключевые категории

Ключевые категории, которые подразумевают под собой высокую долю затрат и высокую критичность. Такая категория требует стратегического управления, например, долгосрочные договоры, развитие поставщиков, многофакторная оценка (качество, сроки, надежность), планирование альтернатив, усиленный входной контроль, совместное планирование поставок.

Затратообразующие категории – это высокая доля затрат и низкая критичность. Фокус в данной категории необходимо держать на оптимизации закупочной цены и условий. Необходимо проводить конкурентные процедуры, анализ рынка, консолидацию объемов, стандартизацию требований при сохранении базового уровня качества.

Обеспечивающие категории – это низкая доля затрат и высокая критичность. Основная ошибка предприятий – это закупка по минимальной цене. Несмотря на небольшую стоимость, сбои поставок вызывают простои и несоразмерные потери. Приоритет в данной категории отдается надежности, а именно страховые запасы, резервные поставщики, контроль сроков, регламенты ускоренного заказа.

Поддерживающие категории подразумевает под собой низкую долю затрат и низкую критичность. Рациональны для данной категории упрощенные процедуры, например, рамочные договоры, минимизация транзакционных издержек, стандартизация и цифровизация заказов.

Предложенная матрица позволяет перейти от универсального ценового критерия к дифференцированным стратегиям закупок, где управленческое внимание и ресурсы сосредоточены на критичных для производства категориях.

Категорийный менеджмент в закупках производственных предприятий является инструментом повышения устойчивости и результативности закупочной деятельности, однако его внедрение часто ограничивается задачей снижения цены и не учитывает различия в критичности закупаемых ресурсов. Основные проблемы внедрения связаны с доминированием ценового критерия, отсутствием дифференцированного управления категориями и недостаточной интеграцией категорийного подхода с управлением качеством и рисками.

Предложенная матричная классификация категорий по экономической значимости и степени влияния на непрерывность производственного процесса позволяет систематизиро-

вать закупки, определить приоритеты управления и сформировать адресные меры по снижению рисков качества и срывов поставок.

Библиографический список

1. Бурлакова, И. В. Применение категорийного менеджмента в процессе закупок на производственных предприятиях / И. В. Бурлакова, Д. А. Карх, Л. С. Ружанская // *Управленец*. - 2019. - Т. 10, № 6. - С. 54-66.
2. ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Системы менеджмента качества. Требования / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — М. : Стандартинформ, 2015.
3. Левандовская, А. М. Методология категорийного подхода как базис сбалансированной модели закупочной деятельности / А. М. Левандовская // *Учет. Анализ. Аудит*. — 2023. — Т. 10, № 4. — С. 97–104.

УДК 005.6; ГРНТИ 81.81

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ И ПРОЦЕДУРНЫХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ

Р.Л. Уваева

*Казанский национальный исследовательский университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
Российская Федерация, Казань, rena.uvaeva@mail.ru*

Аннотация. В статье рассматривается проблема управления испытательной лабораторией. Сегодня лаборатории должны работать качественно, но при этом сталкиваются с нехваткой ресурсов. В статье приведены специальные математические расчёты, которые показывают, насколько эффективным будет то или иное изменение. Если расчёты показывают высокую ожидаемую эффективность, решение принимается. Далее улучшение сначала тестируется на одном участке, и только если оно действительно даёт результат, его внедряют повсеместно. Предложенная модель помогает постепенно улучшать все процессы шаг за шагом, делая работу лаборатории более эффективной.

Ключевые слова: испытательная лаборатория, эффективность, принятие решений, улучшение процессов, управление качеством.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF A TESTING LABORATORY BASED ON ANALYTICAL AND PROCEDURAL MANAGEMENT MODELS

R.L. Uvaeva

*Kazan National Research University named after A.N. Tupolev – KAI,
Russian Federation, Kazan, rena.uvaeva@mail.ru*

Abstract. The article discusses the problem of managing a testing laboratory. Today, laboratories must operate at a high level of quality, but they also face a lack of resources. The article presents special mathematical calculations that show how effective a particular change will be. If the calculations indicate a high expected efficiency, a decision is made. Next, the improvement is first tested in a single area, and only if it proves to be effective is it implemented throughout the laboratory. This proposed model helps to gradually improve all processes step by step, making the laboratory more efficient.

Keywords: testing laboratory, efficiency, decision-making, process improvement, quality management.

Эффективность и результативность деятельности испытательной лаборатории (ИЛ), являющейся критически важным звеном в системах обеспечения качества, технического регулирования и безопасности продукции, напрямую зависят от способности ее руководства к непрерывному совершенствованию процессов.

Актуальность темы исследования обусловлена внешними и внутренними факторами, которые формируют жёсткие требования к процессу управления испытательной лабораторией, поскольку, с одной стороны, действуют нормативные стандарты и конкурентная среда, требующие постоянного совершенствования и прозрачного обоснования любых изменений, а

с другой существует нехватка ресурсов, что вынуждает руководство искать объективные критерии для приоритизации проектов, и именно поэтому возникает методологический пробел, связанный с отсутствием адаптированных инструментов, которые бы сочетали количественную аналитику эффективности с чёткой процедурой принятия решений, что в совокупности и определяет практическую значимость разработки интегрированной модели, способной трансформировать интуитивный выбор в управляемый процесс, основанный на данных и регламентах.

Внедрение любых улучшений, таких как: модернизация оборудования, оптимизация методик испытаний или регламентов системы менеджмента связано с принятием стратегических и тактических управленческих решений, требующих объективного обоснования.

Ключевым инструментом для обоснования таких решений выступает количественная оценка ожидаемой эффективности предлагаемых изменений. Для этого используется система взаимосвязанных показателей результативности и относительной эффективности процесса. Данные показатели, основанные на соотношении плановых и фактических значений затрат и выпуска продукции/услуг, позволяют перевести оценку проекта улучшения из качественной в количественную плоскость. Критерием целесообразности внедрения выступает условие $\mathcal{E}_{\text{ожид}} \geq 1$, что означает достижение или превышение планового уровня эффективности по сравнению с фактическим состоянием процесса.

Оценки показателей результативности на входе $R_{\text{ВХ}}^{\text{ОТЧ}}$ и выходе $R_{\text{ВЫХ}}^{\text{ОТЧ}}$ процесса, а также удельные затраты $y_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОТЧ}}$, $y_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОТЧ}}$ в отчетном году (рисунок 1 б) находят по формулам [1, 2]:

$$R_{\text{ВХ}}^{\text{ОТЧ}} = \frac{Z_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОТЧ}}}{Z_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОТЧ}}}, R_{\text{ВЫХ}}^{\text{ОТЧ}} = \frac{V_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОТЧ}}}{V_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОТЧ}}}, y_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОТЧ}} = \frac{Z_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОТЧ}}}{V_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОТЧ}}}, y_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОТЧ}} = \frac{Z_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОТЧ}}}{V_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОТЧ}}}, \quad (1)$$

где $Z_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОТЧ}}$, $Z_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОТЧ}}$ - плановые и фактические затраты ресурсов, оцениваемые на входе процесса; $V_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОТЧ}}$, $V_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОТЧ}}$ - плановый и фактический выпуск продукции (услуги), оцениваемые на выходе процесса.

Для количественной оценки эффективности процессов в рамках системы менеджмента (СМ) испытательной лаборатории был применен показатель относительной эффективности, расчёт которого представлен на схеме (рисунок 1 б).

$$\mathcal{E}^{\text{ОТЧ}} = R_{\text{ВХ}}^{\text{ОТЧ}} \times R_{\text{ВЫХ}}^{\text{ОТЧ}} = \frac{y_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОТЧ}}}{y_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОТЧ}}}, \quad (2)$$

Оценка итогов реализации процесса в очередном году также осуществлялась посредством применения сходных по структуре формул расчёта показателей результативности и эффективности, при этом графическая интерпретация полученных данных отражена на рисунке 1 г:

$$R_{\text{ВХ}}^{\text{ОЧЕР}} = \frac{Z_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОЧЕР}}}{Z_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОЧЕР}}}, R_{\text{ВЫХ}}^{\text{ОЧЕР}} = \frac{V_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОЧЕР}}}{V_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОЧЕР}}}, y_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОЧЕР}} = \frac{Z_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОЧЕР}}}{V_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОЧЕР}}}, y_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОЧЕР}} = \frac{Z_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОЧЕР}}}{V_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОЧЕР}}}, \quad (3)$$

$$\mathcal{E}^{\text{ОЧЕР}} = R_{\text{ВХ}}^{\text{ОЧЕР}} \times R_{\text{ВЫХ}}^{\text{ОЧЕР}} = \frac{y_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОЧЕР}}}{y_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОЧЕР}}} = \frac{Z_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОЧЕР}}}{V_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОЧЕР}}} \times \frac{V_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОЧЕР}}}{Z_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОЧЕР}}}$$

где $R_{\text{ВХ}}^{\text{ОЧЕР}}$, $R_{\text{ВЫХ}}^{\text{ОЧЕР}}$ - результативности процесса по входу и по выходу в очередном году;

$y_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОЧЕР}}$, $y_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОЧЕР}}$ - плановые и фактические удельные затраты на выпуск единицы продукции/услуги в очередном году;

$\mathcal{E}^{\text{ОЧЕР}}$ - относительный показатель эффективности процесса в очередном году;

$Z_{ПЛАН}^{ОЧЕР} = Z_{ФАКТ}^{ОТЧ} + \Delta Z_{ПЛАН}^{ОЧЕР}$ – плановые затраты на процесс в очередном году, складывающиеся из фактических затрат $Z_{ФАКТ}^{ОТЧ}$ в предыдущем году и предстоящего (планового) увеличения затрат $\Delta Z_{ПЛАН}^{ОЧЕР}$ в очередном году;

$Z_{ПЛАН}^{ОЧЕР}$ - затраты фактические на процесс в очередном году;

$V_{ПЛАН}^{ОЧЕР} = V_{ФАКТ}^{ОТЧ} + \Delta V_{ПЛАН}^{ОЧЕР}$ – плановый выпуск продукции/услуги на выходе процесса в очередном году, складывающийся из фактического выпуска $V_{ФАКТ}^{ОТЧ}$ в отчетном году и планового увеличения выпуска $\Delta V_{ПЛАН}^{ОЧЕР}$ продукции (услуг) в очередном году;

$V_{ПЛАН}^{ОЧЕР}$ - выпуск продукции/услуги фактический в очередном году.

При планировании, а именно в ходе подготовки к принятию проектного решения, целесообразно применять аналогичный описанному выше подход (рисунок 1 в).

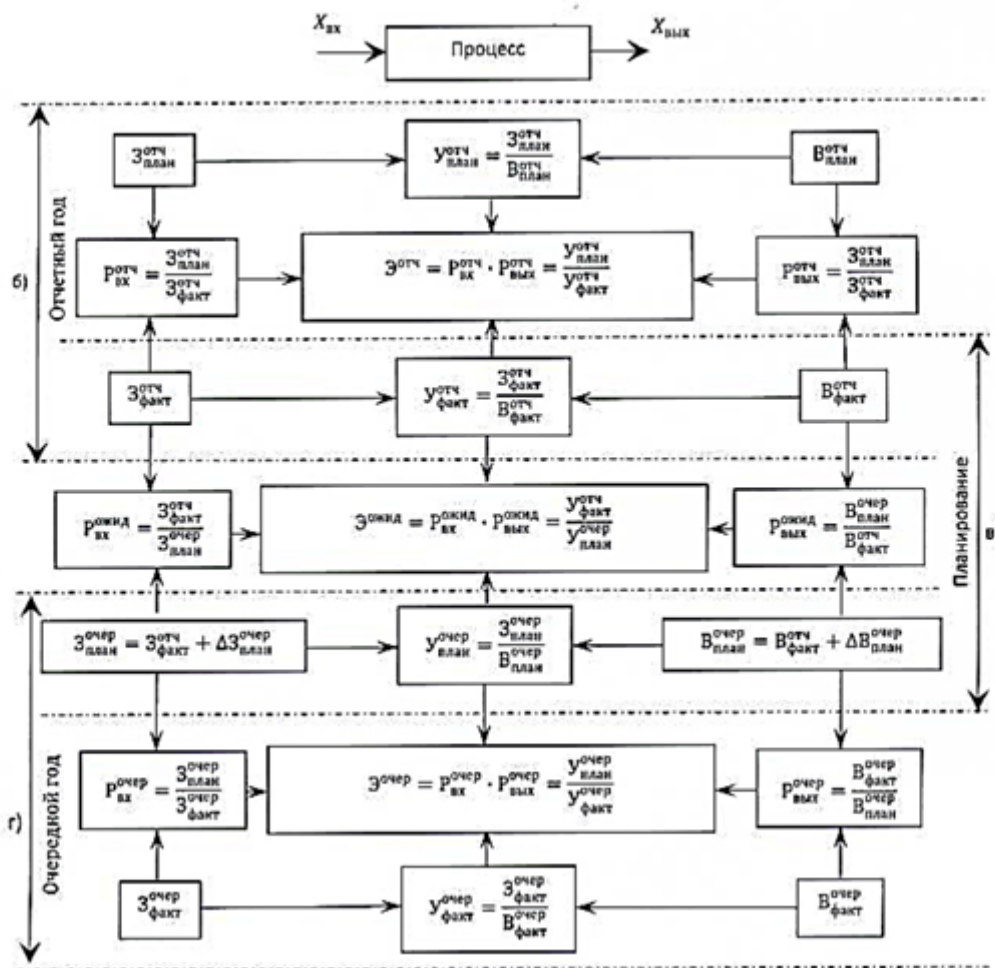


Рис. 1. Аналитическая модель вычисления показателей результативности процесса по входу и по выводу, а также относительного показателя эффективности процесса:

а) схематическое изображение входов и выходов процесса; б) схема вычисления показателей результативности процесса на входе $P_{ВХ}$, выходе $P_{ВЫХ}$ и относительной эффективности \mathcal{E} процесса в отчетном году;

в) схема вычисления показателей $P_{ВХ}^{ОЖИД}$, $P_{ВЫХ}^{ОЖИД}$, $\mathcal{E}^{ОЖИД}$ процесса на этапе планирования на очередной год;

г) схема вычисления показателей $P_{ВХ}^{ОЧЕР}$, $P_{ВЫХ}^{ОЧЕР}$, $\mathcal{E}^{ОЧЕР}$ в очередной год.

Данный подход используется для расчёта ожидаемых значений показателей результативности процесса как по входу $R_{ВХ}^{ОЖИД}$, так и по выходу $R_{ВЫХ}^{ОЖИД}$, а также ожидаемого относительного показателя эффективности $\mathcal{E}^{ОЖИД}$ причём вычисление указанных величин производится по следующим формулам:

$$R_{ВХ}^{ОЖИД} = \frac{Z_{ФАКТ}^{ОТЧ}}{Z_{ПЛАН}^{ОЧЕР}}, R_{ВЫХ}^{ОТЧ} = \frac{V_{ПЛАН}^{ОЧЕР}}{V_{ФАКТ}^{ОТЧ}}, y_{ПЛАН}^{ОТЧ} = \frac{Z_{ПЛАН}^{ОЧЕР}}{V_{ПЛАН}^{ОЧЕР}}, y_{ФАКТ}^{ОТЧ} = \frac{Z_{ФАКТ}^{ОТЧ}}{V_{ФАКТ}^{ОТЧ}},$$

$$\mathcal{E}^{ОЖИД} = R_{ВХ}^{ОЖИД} \times R_{ВЫХ}^{ОЖИД} = \frac{y_{ФАКТ}^{ОТЧ}}{y_{ПЛАН}^{ОЧЕР}} \quad (4)$$

При оценке целесообразности внедрения проекта улучшения процесса ИЛ или СМ ключевым критерием выступает ожидаемое значение относительной эффективности: проект признаётся обоснованным, если $\mathcal{E}^{ОЖИД} \geq 1$ либо незначительно ниже единицы. Разработанная процедурная модель поддержки ЛПР (лица, принимающие решения) (рис. 2) предусматривает, что при выполнении данного условия руководитель одобряет внедрение (блок 4); в противном случае эксперты уточняют возможности улучшения (блок 5) и повторяют цикл оценки. После утверждения решения изменения вносятся локально (например, модернизируется одна из нескольких установок), что позволяет минимизировать ресурсные затраты на этапе апробации.

После завершения модернизации оборудования на объекте приступают к реализации процесса в пилотном режиме (блок 6), строго следуя утверждённому ЛПР решению о внедрении проекта улучшения.

Когда практическое применение модернизированного процесса достигает достаточной степени освоенности (например, спустя год эксплуатации), выполняется оценка реальных показателей его функционирования, зафиксированных по итогам этого периода (блок 7, рис. 2).

$$Z_{ФАКТ}^{ОЧЕР}, V_{ФАКТ}^{ОЧЕР}, R_{ВХ}^{ОЧЕР} = \frac{Z_{ПЛАН}^{ОЧЕР}}{Z_{ФАКТ}^{ОЧЕР}}, R_{ВЫХ}^{ОЧЕР} = \frac{V_{ФАКТ}^{ОЧЕР}}{V_{ПЛАН}^{ОЧЕР}}, y_{ФАКТ}^{ОЧЕР} = \frac{Z_{ФАКТ}^{ОЧЕР}}{V_{ФАКТ}^{ОЧЕР}},$$

$$\mathcal{E}^{ОЧЕР} = R_{ВХ}^{ОЧЕР} \times R_{ВЫХ}^{ОЧЕР} = \frac{y_{ПЛАН}^{ОЧЕР}}{y_{ФАКТ}^{ОЧЕР}} \quad (5)$$

Если при внедрении улучшения на одной установке относительная эффективность оказывается высокой ($\mathcal{E}^{ОЧЕР} \geq 1$ или ≈ 1), ЛПР утверждает новую процедуру (блок 8). В противном случае возвращаются к блоку 5, затем повторяют блоки 3, 4, 6 и 7 (рис. 2).

После утверждения новой процедуры (блок 8) переходят к ее полномасштабному постоянному применению (блок 9): модернизируют оставшиеся установки и проводят все испытания по улучшенной процедуре.

Затем определяют следующий процесс, требующий улучшения (блоки 10 и 11), и повторяют действия блоков 2–11. Выполнение процедурной модели прекращается (блок 12) только после улучшения всех процессов испытаний в лаборатории.

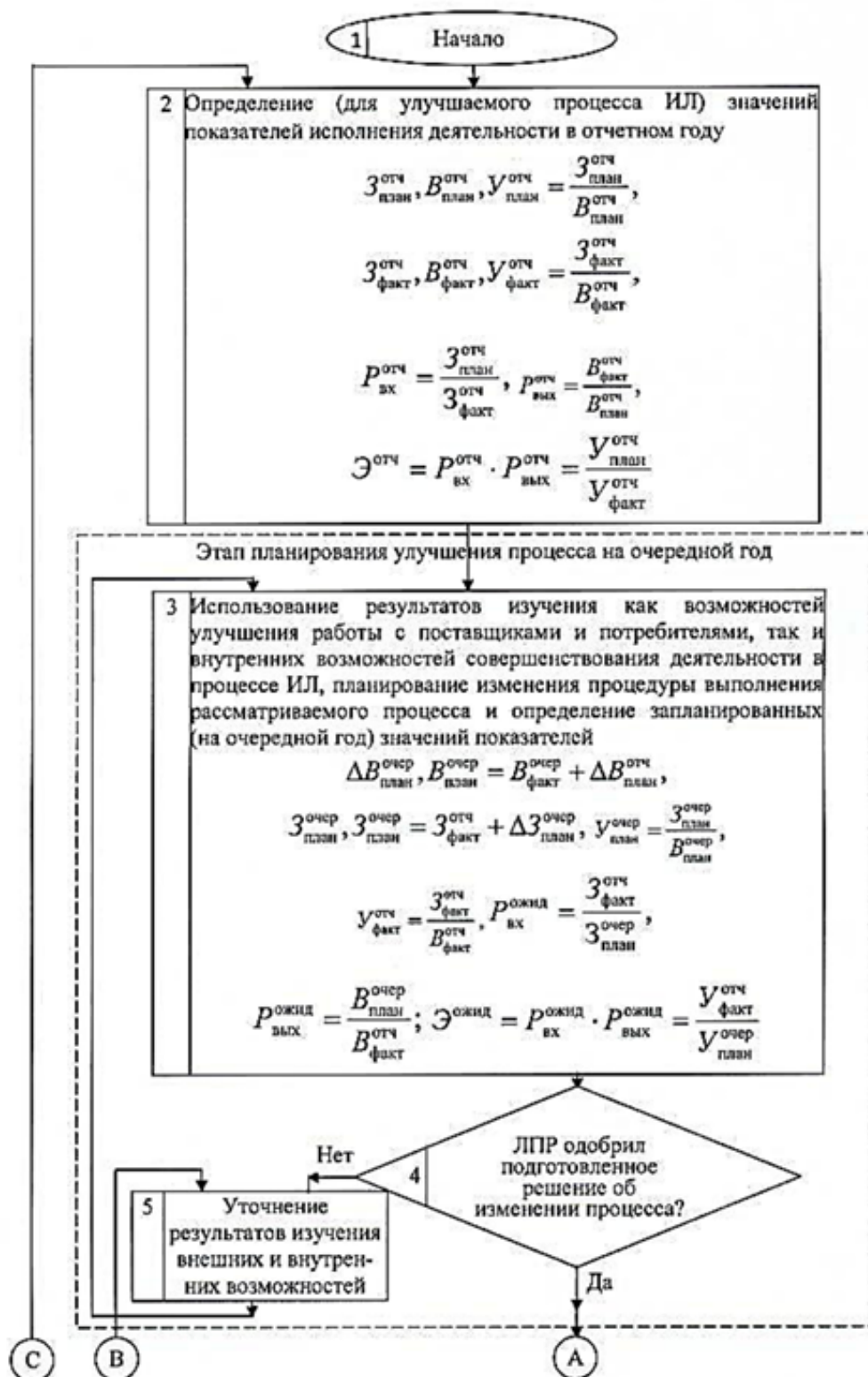


Рис. 2. Аналитическая и процедурная модели поддержки работы ЛПР при подготовке принятия решения

Когда практическое применение модернизированного процесса достигает достаточной степени освоенности (например, спустя год эксплуатации), выполняется оценка реаль-

ных показателей его функционирования, зафиксированных по итогам этого периода (блок 7, рис. 2).

$$\begin{aligned} Z_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОЧЕР}}, V_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОЧЕР}}, R_{\text{ВХ}}^{\text{ОЧЕР}} = \frac{Z_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОЧЕР}}}{Z_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОЧЕР}}}, R_{\text{ВЫХ}}^{\text{ОЧЕР}} = \frac{V_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОЧЕР}}}{V_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОЧЕР}}}, Y_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОЧЕР}} = \frac{Z_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОЧЕР}}}{V_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОЧЕР}}}, \\ \Xi^{\text{ОЧЕР}} = R_{\text{ВХ}}^{\text{ОЧЕР}} \times R_{\text{ВЫХ}}^{\text{ОЧЕР}} = \frac{Y_{\text{ПЛАН}}^{\text{ОЧЕР}}}{Y_{\text{ФАКТ}}^{\text{ОЧЕР}}} \end{aligned} \quad (5)$$

Если при внедрении улучшения на одной установке относительная эффективность оказывается высокой ($\Xi^{\text{ОЧЕР}} \geq 1$ или ≈ 1), ЛПР утверждает новую процедуру (блок 8). В противном случае возвращаются к блоку 5, затем повторяют блоки 3, 4, 6 и 7 (рис. 2).

После утверждения новой процедуры (блок 8) переходят к ее полномасштабному постоянному применению (блок 9): модернизируют оставшиеся установки и проводят все испытания по улучшенной процедуре.

Затем определяют следующий процесс, требующий улучшения (блоки 10 и 11), и повторяют действия блоков 2–11. Выполнение процедурной модели прекращается (блок 12) только после улучшения всех процессов испытаний в лаборатории.

Библиографический список

1. Пономарев, С.В. Формирование и оценка показателей результативности и эффективности процессов СМК / С.В. Пономарев, С.В. Миронов // Стандарты и качество. – 2007. – №8. – С. 70-72.
2. Пономарев, С.В. Управление качеством процессов и продукции. В 3-х кн. Кн.2: Инструменты и методы менеджмента качества процессов в производственной, коммерческой и образовательной сферах: учебное пособие / С.В. Пономарев, Г.А. Соседов, Е.С. Мищенко и др.; под ред. проф. С.В. Пономарева. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 212 с.

УДК: 620.1; ГРНТИ 59.13.21

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

С.В. Губарева

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, volkovasvetlan@yandex.ru*

Аннотация. В работе проведен системный анализ нормативно-правовой базы в области обеспечения единства измерений. Выполнена классификация объектов метрологического обеспечения, включая показатели продукции, средства измерений, испытательное и вспомогательное оборудование. На основе типовой номенклатуры средств измерений и оборудования проведен анализ требований к их метрологическим характеристикам.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, сертификационные испытания, единство измерений, средство измерений (СИ), испытательное оборудование (ИО), поверка, калибровка, аттестация, прослеживаемость.

METROLOGICAL SUPPORT FOR CERTIFICATION TESTS

S.V. Gubareva

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, volkovasvetlan@yandex.ru*

The summary. The paper provides a systematic analysis of the regulatory framework in the field of ensuring the uniformity of measurements. It classifies the objects of metrological support, including product indicators, measuring instruments, and testing and auxiliary equipment. Based on the

standard nomenclature of measuring instruments and equipment, the paper analyzes the requirements for their metrological characteristics.

Keywords: metrological support, certification tests, uniformity of measurements, measuring instruments, testing equipment, verification, calibration, certification, and traceability.

Современный этап развития характеризуется повышением требований к качеству и безопасности продукции. Ключевым инструментом подтверждения соответствия продукции установленным требованиям выступают сертификационные испытания, проводимые аккредитованными испытательными лабораториями (ИЛ). Результаты этих испытаний служат основанием для выдачи сертификата соответствия и допуска продукции на рынок, что накладывает высокую ответственность за их достоверность и объективность.

Однако сам по себе факт проведения испытаний не гарантирует достоверности полученных данных. На результат влияет множество факторов: точность средств измерений (СИ), стабильность и воспроизводимость режимов испытательного оборудования (ИО), квалификация персонала, соблюдение методики. Недостоверный результат может привести к двум одинаково негативным последствиям: либо опасная продукция будет признана безопасной (риск для потребителя), либо качественная продукция будет забракована (экономический ущерб для производителя). В связи с этим, ключевую роль в обеспечении качества испытаний играет их метрологическое обеспечение (МО).

Метрологическое обеспечение представляет собой комплекс научных, организационных, правовых и технических мероприятий, направленных на достижение единства и требуемой точности измерений. В контексте сертификационных испытаний МО выходит за рамки простой поверки приборов и охватывает всю инфраструктуру лаборатории: от состояния испытательного оборудования до квалификации персонала и правил документирования. Требования к системе менеджмента качества испытательной лаборатории, включая все аспекты МО, регламентированы международным стандартом ГОСТ ISO/IEC 17025 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».

Метрологическое обеспечение сертификационных испытаний основывается на стройной иерархии нормативных документов, которые можно разделить на несколько уровней.

Первый, основополагающий уровень, представлен Федеральным законом от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений». Данный закон устанавливает правовые основы обеспечения единства измерений в Российской Федерации, регулирует отношения государственных органов, юридических и физических лиц по вопросам изготовления, ремонта, продажи и эксплуатации средств измерений. Закон определяет такие ключевые понятия, как поверка, калибровка, эталон, методика (метод) измерений, и устанавливает сферы государственного регулирования, к которым относятся испытания для целей обязательной сертификации [1].

Второй уровень образуют национальные и межгосударственные стандарты, конкретизирующие требования к различным аспектам деятельности испытательных лабораторий. Центральное место здесь занимает ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий». Этот стандарт является основой для аккредитации ИЛ. В разделе 6 «Требования к ресурсам» он детально регламентирует требования к:

- помещениям и условиям окружающей среды (6.3);
- оборудованию (6.4), включая необходимость его идентификации, обслуживания и документирования;
- метрологической прослеживаемости (6.5), требуя, чтобы все измерения были прослеживаемы к международным или национальным эталонам;
- валидации методик измерений (7.2) [2].

Третий уровень составляют специализированные стандарты и правила, регулирующие отдельные аспекты МО. Ключевым здесь является ГОСТ Р 8.568-2017 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Аттестация испытательного оборудования. Основные положения». Данный документ устанавливает порядок, методы и критерии аттестации испытательного оборудования [3].

Наконец, четвертый, самый конкретный уровень – это стандарты на методы испытаний конкретных видов продукции. Именно в этих документах устанавливаются:

- контролируемые параметры (показатели продукции);
- номенклатура требуемых средств измерений и их характеристики;
- типы применяемого испытательного и вспомогательного оборудования;
- процедура подготовки, проведения испытаний и обработки результатов.

Таким образом, стандарт на метод испытаний является техническим заданием для метрологического обеспечения всего процесса.

Для эффективного управления процессом испытаний необходимо четко идентифицировать объекты, на которые направлены мероприятия метрологического обеспечения. Анализ практики работы испытательных лабораторий, а также структуры лабораторной работы, позволяет выделить четыре основные группы объектов:

Показатели продукции (контролируемые параметры). Это конкретные физические величины, характеристики или свойства продукции, значения которых должны быть определены в ходе испытаний для вынесения суждения о соответствии.

Средства измерений (СИ). Технические средства, предназначенные для измерений и имеющие нормированные метрологические характеристики.

Испытательное оборудование (ИО). Технические средства, предназначенные для воспроизведения условий испытаний (факторов внешней среды, нагрузок, режимов работы). Достоверность результата испытаний напрямую зависит от того, насколько точно ИО поддерживает заданные режимы. Поэтому ключевой процедурой МО для ИО является аттестация.

Вспомогательное оборудование и материалы. Элементы, которые непосредственно не являются ни СИ, ни ИО, но влияют на ход испытаний.

Поддержание всех перечисленных объектов в состоянии, гарантирующем достоверность результатов, достигается путем проведения ряда обязательных процедур:

- поверка и калибровка средств измерений;
- аттестация испытательного оборудования;
- стандартизация и аттестация методик измерений (МВИ);
- оценка неопределенности (или погрешности) измерений.

Таким образом, теоретическая база метрологического обеспечения представляет собой комплексную систему, где законодательные акты создают правовое поле, стандарты устанавливают требования, а конкретные процедуры (поверка, аттестация) обеспечивают их выполнение для всех элементов испытательного процесса.

Модель процесса испытания

Любое сертификационное испытание, независимо от его вида и сложности, может быть представлено в виде обобщенной модели, состоящей из нескольких взаимосвязанных этапов:

Объект испытаний. Изделие или образец продукции, подготовленный в соответствии с требованиями нормативной документации.

Воздействие. Приложение к объекту испытаний заданных факторов (электрического напряжения, температуры, влажности, механической нагрузки и т.д.).

Измерение. Количественная оценка реакции объекта на воздействие или оценка его состояния после воздействия.

Оценка результата. Сравнение полученных значений с установленными в нормативной документации критериями и вынесение заключения о соответствии или несоответствии.

Достоверность результата на каждом из этапов должна быть обеспечена соответствующими метрологическими процедурами. Интеграция этих процедур в модель процесса испытаний представлена на рисунке 1 (описание схемы).

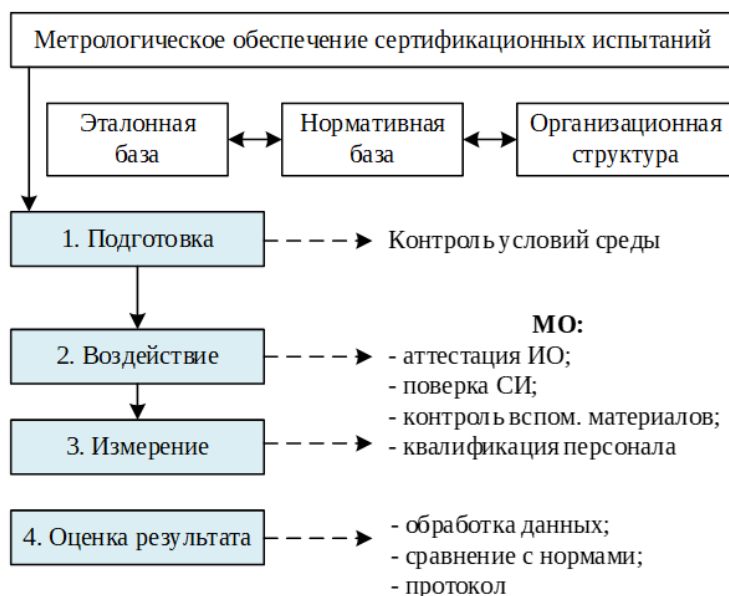


Рис. 1. Обобщенная схема метрологического обеспечения сертификационных испытаний

Предлагаемая обобщенная схема метрологического обеспечения включает следующие компоненты, соответствующие этапам модели:

На этапе подготовки объекта. Хотя сам объект испытаний не является объектом метрологического обеспечения, условия его подготовки (например, выдержка в нормальных климатических условиях) могут контролироваться с использованием поверенных СИ (термометров, гигрометров). Методика подготовки объекта регламентируется в стандарте на метод испытаний.

На этапе воздействия (Испытательное оборудование). Достоверность создаваемых условий обеспечивается аттестацией испытательного оборудования. В ходе периодической аттестации подтверждается, что фактические параметры воздействия (например, температура в камере, испытательное напряжение) соответствуют заданным в пределах установленных допусков. Результаты аттестации оформляются протоколом и наносятся на оборудование в виде отметки (бирки, наклейки) с указанием срока действия.

На этапе измерения (Средства измерений). Точность количественной оценки контролируемого параметра гарантируется поверкой (калибровкой) средств измерений. Наличие действующего свидетельства о поверке (или сертификата о калибровке с прослеживаемостью) является обязательным условием допуска СИ к применению. Важно также, чтобы диапазон измерения и класс точности СИ соответствовали требованиям методики.

На этапе проведения процедуры (Методика). Вся последовательность действий оператора, подключение оборудования, режимы работы, порядок отсчета показаний строго регламентированы стандартизированной методикой выполнения измерений (МВИ) или методом испытаний. Если методика не стандартизована, она должна пройти процедуру аттестации.

На этапе оценки результата. Лаборатория должна располагать документально оформленными критериями соответствия, которые установлены в том же стандарте или тех-

нических условиях на продукцию. Сама процедура оценки и оформления протокола испытаний также должна быть стандартизована в рамках системы менеджмента качества лаборатории.

Метрологическое обеспечение сертификационных испытаний представляет собой не просто набор отдельных процедур (поверка приборов или аттестация оборудования), а сложную, многоуровневую систему. Ее эффективность определяется комплексным подходом, при котором каждый этап испытательного процесса — от подготовки объекта до оформления протокола — находится под метрологическим контролем [4].

Пренебрежение любым из элементов этой системы (например, использование не поверенного вольтметра во встроенном в испытательную установку или отсутствие контроля качества воды для камеры влажности) способно скомпрометировать результаты испытаний и привести к ошибочному заключению о соответствии продукции. Это, в свою очередь, несет риски как для безопасности потребителей, так и для репутации и экономического благополучия производителя [5, 6].

Таким образом, обеспечение единства и требуемой точности измерений через поверку СИ, подтверждение воспроизводимости условий через аттестацию ИО и строгое следование стандартизованным методикам является фундаментальным условием компетентности испытательной лаборатории. Дальнейшее развитие метрологического обеспечения должно быть направлено на автоматизацию процессов сбора и обработки данных, внедрение риск-ориентированного подхода к установлению интервалов между поверками и аттестациями, а также на гармонизацию национальных требований с международными стандартами для взаимного признания результатов испытаний.

Библиографический список

1. Федеральный закон № 102-ФЗ : [принят Государственной Думой 11 июня 2008 года : одобрен Советом Федерации 18 июня 2008 года]. – Москва : Кремль, 2008. 20 с.
2. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – Москва : Стандартинформ, 2019. 32 с.
3. ГОСТ Р 8.568-2017. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Аттестация испытательного оборудования. Основные положения. – Москва : Стандартинформ, 2017. 12 с.
4. Бочаров В.А., Волосатова Т.М., Филиппов М.В., Чичаева Л.В., Продан С.А. Декомпозиция и агрегация функциональных моделей систем / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 89. С. 85-93.
5. Абрамов А.М. Анализ эффективности метода метрологического испытания при вычислении интегральной нелинейности АЦП / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 90. С. 133-143.
6. Гуляева К. А., Артемьева И. Л. Инструментарий для проектирования систем понятий и баз знаний предметных областей с объектами сложной структуры // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 87. С. 62-77.

УДК: 519.248; ГРНТИ 81.81

ОРГАНИЗАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО ВЫБОРОЧНОГО КОНТРОЛЯ ПРОДУКЦИИ ПО АЛЬТЕРНАТИВНОМУ ПРИЗНАКУ

С.В. Губарева

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, volkovasvetlan@yandex.ru*

Аннотация. В статье рассматриваются теоретические и практические аспекты организации статистического приемочного контроля качества продукции по альтернативному признаку. Анализируется фундаментальная дилемма выбора между сплошным и выборочным контролем, обосновывается необходимость применения статистических методов для принятия решений в условиях неопределенности. Раскрывается математический аппарат выборочного контроля, включая понятия приемочного уровня дефектности (AQL), предельного качества (LQ), рисков поставщика (α) и потребителя (β), а также оперативной характеристики плана. Подробно рассматривается структура и алгоритмы работы с основополагающим стандартом ГОСТ Р ИСО 2859-1 как с инструментом, балансирующим интересы производителя и заказчика.

Ключевые слова: статистический контроль, выборочный контроль, альтернативный признак, AQL, риск поставщика, риск потребителя, оперативная характеристика, план контроля, качество продукции.

ORGANIZATION OF STATISTICAL SAMPLING CONTROL OF PRODUCTS BY ALTERNATIVE CHARACTERISTICS

S.V. Gubareva

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, volkovasvetlan@yandex.ru*

The summary. The article discusses the theoretical and practical aspects of organizing statistical acceptance testing of product quality based on an alternative characteristic. It analyzes the fundamental dilemma of choosing between continuous and selective testing, and justifies the need to use statistical methods for making decisions under uncertainty. The article also explores the mathematical framework of selective testing, including the concepts of acceptance quality level (AQL), limit quality (LQ), supplier risk (α), and consumer risk (β), as well as the operational characteristics of the plan. The article provides a detailed description of the structure and algorithms for working with the fundamental standard GOST R ISO 2859-1 as a tool that balances the interests of the manufacturer and the customer.

Keywords: statistical control, selective control, alternative feature, AQL, supplier risk, consumer risk, operational characteristic, control plan, product quality.

В современном промышленном производстве проблема обеспечения стабильного качества продукции стоит на одном из первых мест. Для ее решения предприятия внедряют системы менеджмента качества, используют современное оборудование и методы статистического управления процессами. Однако финальной и важнейшей инстанцией, отделяющей качественное изделие от потребителя, остается контроль – процедура проверки соответствия продукции установленным требованиям. Именно на этом этапе инженер сталкивается с фундаментальной дилеммой выбора метода и объема контроля.

Выборочный контроль по альтернативному признаку – это система принятия решений о качестве партии продукции в условиях неполной информации и статистической неопределенности.

Отправной точкой данной системы является доля дефектных единиц в партии (p). Это реальное, но, как правило, неизвестное число, представляющее собой отношение количества дефектных единиц в партии к ее общему объему (N). Задача выборочного контроля – оценить этот параметр и на основе оценки принять решение.

Ключевой характеристикой любого плана выборочного контроля является вероятность приемки $L(p)$. Это функция, показывающая, какова вероятность того, что партия с фактической долей дефектов p будет признана годной по результатам контроля. Функция $L(p)$

обладает важными свойствами: $L(0)=1$ (идеальная партия всегда принимается), $L(1)\approx 0$ (полностью дефектная партия всегда бракуется). Главное свойство – монотонное убывание, то есть чем хуже качество партии (чем больше p), тем меньше у нее шансов быть принятой.

График функции $L(p)$ называется оперативной характеристикой (ОХ) плана контроля и служит его своеобразным «профилем эффективности». Он наглядно демонстрирует, как конкретный план будет «вести себя» с партиями разного качества.

Поскольку решение о качестве всей партии принимается по результатам проверки выборки, ошибки неизбежны. Теория математической статистики выделяет два типа таких ошибок, которые в контексте контроля качества получили названия рисков поставщика и потребителя.

Риск поставщика (α), или риск первого рода, – это вероятность забраковать «хорошую» партию, качество которой соответствует установленным требованиям. Формально это можно записать как $\alpha=1-L(AQL)$. Проблема необоснованной браковки ложится на плечи поставщика, заставляя его нести убытки на перепроверку, сортировку и утилизацию качественной продукции.

Риск потребителя (β), или риск второго рода, – это вероятность принять «плохую» партию, уровень дефектности которой считается недопустимым. Формально $\beta=L(LQ)$. Этот риск несет уже потребитель, который получает некачественную продукцию со всеми вытекающими последствиями – от сбоев в собственном производстве до аварийных ситуаций.

Задача инженера заключается не в том, чтобы полностью исключить эти риски (это невозможно без 100% контроля), а в том, чтобы управлять ими, задавая приемлемые для обеих сторон вероятности. В большинстве стандартов заложены значения $\alpha\leq 0,05$ (не более 5%) и $\beta\leq 0,10$ (не более 10%).

Чтобы сделать риски управляемыми, необходимо договориться о критериях, разделяющих «хорошие» и «плохие» партии. Такими критериями являются два ключевых параметра.

Приемочный уровень дефектности (AQL) – это не технический допуск, а экономико-договорной параметр. Он определяет максимальный процент дефектных единиц в партии, который считается удовлетворительным средним уровнем качества процесса. Партии с качеством $p\leq AQL$ считаются «хорошими». Значение AQL выбирается в контракте и зависит от критичности дефекта: для критических дефектов (влияющих на безопасность) AQL может составлять 0,1% или 0,25%, для малозначительных (внешний вид) – 2,5% и выше.

Предельный уровень качества (LQ) – это граница, за которой качество считается абсолютно неудовлетворительным. Партии с качеством $p\geq LQ$ должны быть отсеяны с высокой вероятностью. Обычно LQ в 5-10 раз хуже (больше), чем AQL. Если AQL = 1,0%, то LQ может быть установлен на уровне 5,0% или 7,0%.

Все приведенные понятия – AQL, LQ, α , β и сам план контроля (объем выборки n и приемочное число Ac) – обретают единство на графике оперативной характеристики (рисунок 1).

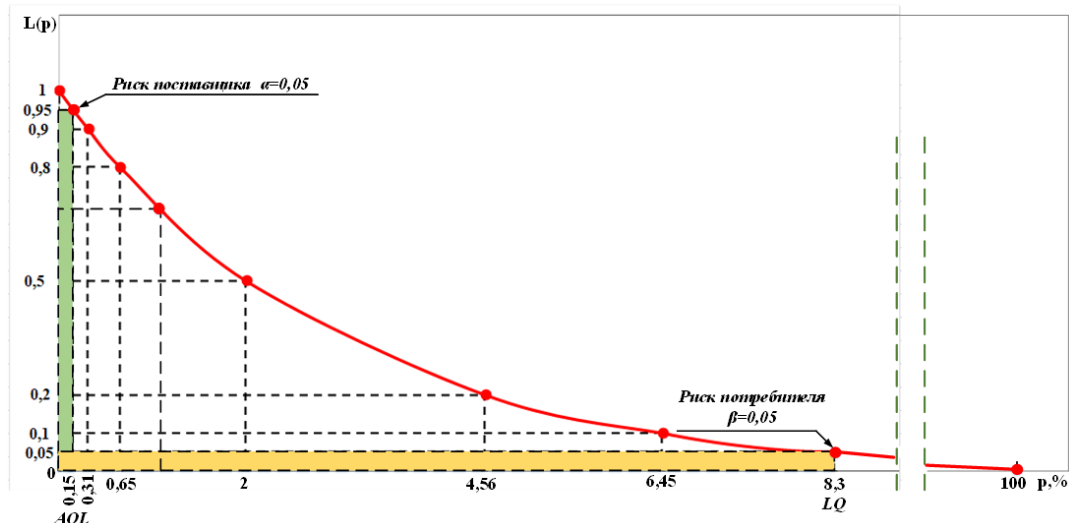


Рис. 1. Оперативная характеристика плана контроля

Для этого на горизонтальной оси (p) отмечают точки AQL и LQ. На вертикальной оси (вероятность приемки) отмечают уровни, соответствующие рискам: $L(AQL)=1-\alpha$ и $L(LQ)=\beta$. Точки пересечения (AQL; $1-\alpha$) и (LQ; β), лежащие на кривой ОХ, однозначно задают конкретный план контроля (n , A_c). Только одна S-образная кривая может пройти через эти две точки.

Увеличение объема выборки (n) делает кривую ОХ круче. Это означает, что план становится более «разборчивым», лучше отличает хорошие партии от плохих. Зона неопределенности между AQL и LQ сужается. Платой за это является рост затрат на контроль.

Увеличение приемочного числа (A_c) сдвигает всю кривую ОХ вправо. План становится «мягче», он готов принимать партии с более высоким процентом брака, что ведет к росту β -риска (риска потребителя).

Таким образом, задача проектировщика сводится к нахождению такого плана (n , A_c), оперативная характеристика которого обеспечит требуемые риски α и β для заданных договорных границ AQL и LQ. В подавляющем большинстве практических ситуаций инженеру не нужно решать сложные уравнения, так как вся необходимая работа уже проделана и сведена в таблицы национальных стандартов серии ГОСТ Р ИСО 2859.

Если бы каждое предприятие разрабатывало собственные методики расчета планов выборочного контроля, это привело бы к полному хаосу во взаимоотношениях между поставщиками и потребителями. Для создания единого «языка качества» были разработаны национальные стандарты, и основным рабочим инструментом в этой области является ГОСТ Р ИСО 2859-1 «Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Часть 1. Планы выборочного контроля последовательных партий на основе приемлемого уровня качества AQL» [1].

Философия этого стандарта заключается в том, что он принимает ключевое управленческое решение за пользователя. Помня о двух видах рисков (α и β), разработчики стандарта фиксируют риск поставщика α на уровне примерно 5%. Это означает, что добросовестный поставщик, стабильно поставляющий продукцию с уровнем дефектности, не превышающим оговоренный AQL, будет необоснованно наказан (его партию забракуают) не более чем в 5 случаях из 100.

Таким образом, пользователю стандарта остается сделать всего один осознанный выбор – определить AQL для различных видов дефектов, а все остальное – объем выборки, приемочные и браковочные числа – стандарт предоставит в готовом виде по четким таблицам [7].

Работа с ГОСТ Р ИСО 2859-1 представляет собой четкий, пошаговый алгоритм, состоящий из нескольких этапов.

Шаг 1. Определение объема партии и кода выборки. Чтобы избежать громоздких таблиц, стандарт группирует партии схожего размера и присваивает им буквенный код. Входными данными являются фактический объем партии (N) и выбранный уровень контроля. На практике чаще всего используется общий уровень II (нормальный). Уровень I дает меньший объем выборки (менее строгий контроль), уровень III – больший (более строгий).

Шаг 2. Определение параметров плана (n , A_c , Re). На пересечении строки с найденным кодом и колонки с выбранным значением AQL мы видим два числа: верхнее (приемочное число A_c) и нижнее (браковочное число Re). Объем выборки (n) для данного кода также указан в стандарте. Полученный план интерпретируется следующим образом: из партии случайным образом отбирается n единиц продукции. После их проверки подсчитывается количество дефектных единиц d . Если $d \leq A_c$ – партия принимается, если $d \geq Re$ – партия бракуется.

Важнейшей особенностью стандарта, превращающей его из статичного справочника в «интеллектуальную» систему, являются правила переключения. Система не остается неизменной, а адаптируется к реальному качеству поставок, поощряя надежных поставщиков и наказывая недобросовестных.

Стандарт предусматривает три режима контроля:

Нормальный контроль – стартовый режим для нового поставщика.

Усиленный контроль – вводится, если качество поставщика ухудшается. Условие для перехода: 2 из 5 последних партий забракованы. При усиленном контроле объем выборки увеличивается или приемочное число уменьшается (становится труднее принять партию).

Ослабленный контроль – применяется для поощрения стабильно хорошего качества. Условие для перехода: 10 партий подряд приняты при нормальном контроле. Ослабленный контроль позволяет экономить ресурсы за счет уменьшения объема выборки.

Эта система создает мощный экономический стимул для поставщика поддерживать высокий уровень качества, чтобы выйти на ослабленный контроль и получить конкурентное преимущество.

ГОСТ Р ИСО 2859-1 является лишь первой, хотя и самой известной, частью обширного семейства стандартов, каждое из которых предназначено для решения специфических задач контроля.

ГОСТ Р ИСО 2859-2 (Планы выборочного контроля отдельных партий на основе предельного качества LQ). Этот стандарт применяется для контроля отдельных, изолированных партий, когда нет информации о качестве предыдущих поставок. Здесь ключевым параметром является не AQL, а LQ – предельное качество, которое служит защитой потребителя от неудовлетворительной продукции [2].

ГОСТ Р ИСО 2859-3 (контроль с пропуском партий). Он применяется для стимулирования стабильно высокого качества при долгосрочном сотрудничестве. Суть метода заключается в том, что при доказанной стабильности процесса и безупречной репутации поставщика, потребитель может перейти на режим, при котором контролируется не каждая партия, а, например, одна из трех или одна из пяти. Это резко сокращает издержки на контроль. Однако этот режим требует предварительной квалификации как продукции, так и самого поставщика, а также строгого соблюдения правил переключения обратно на нормальный контроль при возникновении проблем [3].

ГОСТ Р ИСО 2859-4 (оценка соответствия заявленному уровню качества). Данный стандарт используется не для приемки партий, а для проверки достоверности утверждений поставщика о качестве своей продукции. Результатом проверки является не «партия принята/забракована», а вывод «заявленный уровень качества подтвержден/не подтвержден». Это мощный инструмент для аудита и надзорных органов [4].

ГОСТ Р ИСО 2859-5 (Система последовательных планов на основе AQL для контроля последовательных партий). Этот стандарт ориентирован на минимизацию объема выборки при контроле последовательных партий. Решение о приемке или браковке принимается не после проверки фиксированного объема, а по мере накопления данных. Как только накопленной статистической информации становится достаточно для вывода, контроль прекращается. Это наиболее экономичный с точки зрения объема выборки метод, но он сложнее в администрировании [5].

Вся теория статистического контроля теряет смысл, если нарушен главный принцип отбора единиц в выборку – принцип репрезентативности. Выборка должна быть уменьшенной, но точной копией партии, чтобы каждый ее элемент имел равную вероятность попасть в выборку. В противном случае все вероятностные расчеты (риски α и β , оперативная характеристика) становятся недействительными.

ГОСТ Р 50779.12-2021 «Статистические методы. Методы случайного отбора выборок штучной продукции» устанавливает следующие основные методы обеспечения случайности [6].

Отбор с применением таблиц (или генераторов) случайных чисел. Это наиболее объективный метод, применяемый, когда продукция представлена способом «ряд» (каждую единицу можно пронумеровать). Все номера единиц заносятся в таблицу, и с помощью датчика случайных чисел выбираются те, которые попадут в выборку.

Многоступенчатый отбор. Применяется для продукции в упаковке. Сначала случайным образом отбираются упаковочные единицы (ящики, коробки), а затем из них «вслепую» или снова случайно извлекаются единицы продукции. Важно, чтобы из каждой отобранной упаковки бралось примерно одинаковое количество изделий.

Отбор «вслепую». Применяется для продукции в россыпи (например, болты, гайки в ящике). Контролер, не глядя, извлекает изделия из разных частей упаковки. Этот метод не следует применять, если дефектные единицы можно определить органолептически (на ощупь, по цвету).

Систематический отбор. Применяется при контроле потока продукции (с конвейера). Отбирается, например, каждая 10-я или каждая 20-я деталь. Критически важно, чтобы интервал отбора не совпадал с возможным периодом изменения контролируемого параметра (например, не отбирать каждую деталь, изготовленную после смены инструмента).

Статистический выборочный контроль – это не просто техническая процедура проверки изделий. Это математически обоснованный и экономически взвешенный механизм управления рисками. Он позволяет формализовать процесс принятия решений в условиях неопределенности, заменяя интуицию и субъективизм строгими вероятностными моделями. План контроля в этом контексте выступает как инструмент распределения рисков между поставщиком (риск α), потребителем (риск β) и обществом в целом, находя экономически приемлемый компромисс между стоимостью контроля и потерями от пропуска брака.

Использование ГОСТ Р ИСО 2859-1 и смежных стандартов обеспечивает всех участников производственной цепочки единым, понятным и юридически признанным языком качества. Фиксация риска поставщика на уровне 5% и предоставление поставщику права выбора AQL создает прозрачные и справедливые правила игры. Динамическая система переключения (нормальный – усиленный – ослабленный контроль) превращает стандарт из статического справочника в адаптивный механизм, стимулирующий поставщика к постоянному повышению качества [8, 9].

Важно понимать, что даже самый совершенный приемочный контроль не может исправить плохой процесс. Контроль должен быть индикатором состояния процесса, а не единственным средством обеспечения качества. Поэтому статистические методы приемочного контроля необходимо применять в комплексе с методами статистического управления про-

цессами, анализа измерительных систем и другими инструментами системы менеджмента качества.

Кроме того, выборочный контроль имеет свои границы применимости. Он неэффективен для очень малых партий ($N < 50-100$), где проще и дешевле провести сплошной контроль. Он не должен применяться для дефектов, связанных с безопасностью жизни и здоровья, где риск потребителя β должен стремиться к нулю, что требует либо сплошного контроля, либо принципиально иных подходов к обеспечению надежности.

Библиографический список

1. ГОСТ Р ИСО 2859-1-2007 Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Часть 1. Планы выборочного контроля последовательных партий на основе приемлемого уровня качества AQL. — М.: Стандартинформ, 2007. — 86 с.
2. ГОСТ Р ИСО 2859-2-2022 Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Часть 2. Планы выборочного контроля отдельных партий на основе предельного качества LQ. — М.: Российский институт стандартизации, 2022. — 24 с.
3. ГОСТ Р ИСО 2859-3-2009 Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Часть 3. Контроль с пропуском партий. — М.: Стандартинформ, 2010. — 32 с.
4. ГОСТ Р ИСО 2859-4-2023 Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Часть 4. Оценка соответствия заявленному уровню качества. — М.: Российский институт стандартизации, 2023. — 36 с.
5. ГОСТ Р ИСО 2859-5-2009 Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по альтернативному признаку. Часть 5. Система последовательных планов на основе AQL для контроля последовательных партий. — М.: Стандартинформ, 2010. — 20 с.
6. ГОСТ Р 50779.12-2021 Статистические методы. Методы случайного отбора выборок штучной продукции. — М.: Российский институт стандартизации, 2021. — 24 с.
7. Бочаров В.А., Волосатова Т.М., Филиппов М.В., Чичаева Л.В., Продан С.А. Декомпозиция и агрегация функциональных моделей систем / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 89. С. 85-93.
8. Абрамов А.М. Анализ эффективности метода метрологического испытания при вычислении интегральной нелинейности АЦП / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 90. С. 133-143.
9. Пылькин А.Н., Тишкина В.В. Информационная система формирования управленческих решений по улучшению текущего состояния объекта управления / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 91. С. 76-86.

УДК: 658.562; ГРНТИ 81.81.21

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ НЕСООТВЕТСТВУЮЩЕЙ РАБОТОЙ

С.В. Губарева

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, volkovasvetlan@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема обеспечения единства измерений и достоверности результатов контроля технологических параметров на промышленном предприятии. На основе анализа требований нормативной документации и принципов менеджмента качества разработан и предложен к внедрению процесс управления несоответствующей работой средств измерений. Подробно описана методология решения проблемы, включающая анализ исходных данных, выделение ключевых факторов влияния, оценку рисков и экономических последствий. Представлена разработанная матрица распределения ответственности в рамках процесса. Обоснован выбор оптимального корректирующего мероприятия на основе критериев стоимости реализации и приоритетного числа риска (RPN).

Ключевые слова: управление несоответствующей работой, средства измерений (СИ), обеспечение единства измерений, поверка, анализ рисков, FMEA-анализ, приоритетное число риска (RPN), корректирующие мероприятия, менеджмент качества, промышленная безопасность.

DEVELOPMENT OF THE MANAGEMENT PROCESS FOR INCORRECT WORK

S.V. Gubareva

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, volkovasvetlan@yandex.ru*

The summary. The article discusses the problem of ensuring the unity of measurements and the reliability of the results of monitoring technological parameters at an industrial enterprise. Based on the analysis of the requirements of regulatory documentation and the principles of quality management, a process for managing the non-conformant operation of measuring instruments has been developed and proposed for implementation. The article provides a detailed description of the methodology for solving the problem, which includes the analysis of initial data, the identification of key influencing factors, and the assessment of risks and economic consequences. The article also presents a developed matrix for distributing responsibilities within the process. The article justifies the selection of the optimal corrective action based on the criteria of implementation cost and risk priority number (RPN).

Keywords: management of non-conforming work, means of measurement (M), ensuring the uniformity of measurements, calibration, risk analysis, FMEA analysis, risk priority number (RPN), corrective measures, quality management, industrial safety.

В условиях цифровой трансформации достоверность получаемой измерительной информации приобретает критическое значение для принятия управленческих решений, обеспечения безопасности технологических процессов и выпуска конкурентоспособной продукции.

Особую значимость проблема достоверности измерений приобретает в сферах, связанных с коммерческим и технологическим учетом энергоресурсов (природный газ, нефтепродукты, электроэнергия, тепло). Именно здесь погрешность измерений влечет за собой не только технологические риски, но и прямые экономические потери, а также потенциальные штрафные санкции со стороны надзорных органов и поставщиков ресурсов. Некорректные показания датчиков давления, расхода или температуры могут привести к нестабильной работе регуляторов, перерасходу сырья, выпуску бракованной продукции и созданию аварийных ситуаций, угрожающих жизни персонала и целостности оборудования.

Законодательство РФ устанавливает жесткие требования к обеспечению единства измерений. В соответствии с ФЗ от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (статья 13), средства измерений (СИ), предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, подлежат обязательной периодической поверке. Данное требование продублировано и в международных стандартах на системы менеджмента качества. Так, ГОСТ Р ИСО 9001-2015 обязывает предприятие обеспечивать прослеживаемость измерений и подтверждать пригодность СИ через установленные интервалы времени, гарантируя, что измерительное оборудование откалибровано или поверено [1, 2].

Однако сложившаяся практика организации метрологического обеспечения на многих российских предприятиях имеет существенный недостаток. Сам факт проведения периодической поверки не гарантирует безаварийной и корректной работы оборудования в течение всего межповерочного интервала. Между моментом возникновения несоответствия и моментом его выявления в ходе очередной поверки или калибровки существует значительный временной лаг. В этот «слепой» период технологический процесс управляется на основе недостоверных данных.

Таким образом, основная научно-практическая проблема заключается в противоречии между требованием обеспечения достоверности измерений в каждый момент времени и дискретным характером контроля пригодности СИ (только в моменты поверок). Традиционная система метрологического надзора носит реактивный характер: она фиксирует факт несоответствия постфактум, когда негативные последствия уже могли наступить.

В связи с вышеизложенным возникает объективная необходимость перехода от пассивного ожидания очередной поверки к активному управлению работоспособностью СИ в реальном времени или с минимальной задержкой. Требуется разработка и внедрение формализованного процесса управления несоответствующей работой средств измерений, который позволял бы выявлять, анализировать и устранять отклонения оперативно, минимизируя их негативное влияние на производство.

Традиционный подход к эксплуатации СИ, основанный исключительно на планово-предупредительных ремонтах и периодической поверке, не учитывает случайную природу многих отказов. Для повышения надежности и достоверности измерений предлагается внедрение концепции управления несоответствующей работой как неотъемлемой части системы менеджмента качества предприятия.

Под управлением несоответствующей работой (далее – УНР) понимается скоординированная деятельность по руководству и управлению организацией в отношении выявления, анализа и устранения отклонений в работе оборудования, которые могут привести к нарушению требований к качеству продукции, безопасности процессов или достоверности учета.

Предлагается рассматривать УНР как циклический процесс (цикл PDCA), интегрированный в общую систему менеджмента предприятия. Ключевыми этапами этого процесса являются:

1. Планирование (Plan). Идентификация критически важных СИ, анализ возможных видов отказов и их последствий, разработка регламентов мониторинга.

2. Выполнение (Do). Мониторинг работы СИ, сбор данных, проведение технического обслуживания, выявление признаков несоответствия (например, «зависание» показаний, резкие скачки, несоответствие показаний двух приборов).

3. Проверка (Check). Идентификация причины несоответствия, анализ влияния на технологический процесс и продукцию, оценка рисков от продолжения эксплуатации неисправного прибора.

4. Действие (Act). Принятие решения о дальнейшей эксплуатации, ремонте, замене или проведении внеочередной поверки. Разработка и реализация корректирующих мер для предотвращения повторения.

Для перехода от субъективных оценок к объективным, количественно измеримым показателям при управлении несоответствиями целесообразно применять методологию анализа видов и последствий потенциальных отказов (FMEA). Данная методология, широко применяемая в автомобилестроении, авиации и других высокотехнологичных отраслях, позволяет системно подойти к оценке рисков.

Ключевым показателем в методологии FMEA является приоритетное число риска (RPN). Оно рассчитывается как произведение трех факторов, оцениваемых экспертно по заранее согласованной шкале (например, от 1 до 10):

$$RPN=S \cdot O \cdot D, \quad (1)$$

где S – тяжесть последствий;

O – частота возникновения;

D – вероятность обнаружения.

Применение FMEA позволяет:

- Ранжировать все потенциальные риски, связанные с работой СИ, по степени их значимости (от наиболее критичных к наименее важным);

- выявить «слабые места» существующей системы эксплуатации и метрологического обеспечения;

- обоснованно выбирать те риски, которые требуют первоочередного вмешательства и разработки корректирующих мероприятий;

- количественно оценить эффективность предлагаемых мер, сравнивая значения RPN «до» и «после» их внедрения.

Ключевым элементом процесса управления несоответствующей работой является четкое распределение ролей и ответственности между персоналом. Без формализации ответственности даже самые совершенные методики анализа рисков останутся теоретическими выкладками, не реализованными на практике. Для визуализации взаимодействия участников процесса разработана матрица ответственности (таблица 1), которая определяет степень участия каждого сотрудника или подразделения на различных этапах управления несоответствиями.

Таблица 1. Матрица распределения ответственности в процессе управления несоответствующей работой СИ

Этап процесса / Участник	Начальник цеха (ОТК)	Метрологическая служба	Служба главного инженера (ремонт)	Оперативный персонал (КИПиА)
Мониторинг работы СИ	У	О		И (ежедневно)
Выявление признаков несоответствия	У	О		И (докладная)
Диагностика и поиск причины отказа		О (метрологическая экспертиза)	У (проверка монтажа)	И (первичная проверка)
Анализ влияния на техпроцесс	О	У	У	У
Принятие решения (ремонт/замена)	О (утверждает)	У (заключение)	И (организует)	У
Разработка корректирующих мер	О	И (предложения)	И (предложения)	
Контроль эффективности	О	И (поверка/калибровка)		И (входной контроль после монтажа)

Обозначения: Ответственный (О); Исполнитель (И); Участник (У)

Данная матрица позволяет решить следующие задачи:

- исключение дублирования функций и «зон безответственности»;
- обеспечение персональной ответственности за своевременное выявление несоответствий;
- легитимизация решений о замене или ремонте оборудования (через утверждение ответственным лицом);
- создание основы для разработки стандарта организации (СТО) по управлению несоответствующей работой СИ.

Для обоснования необходимости инвестиций в улучшение процесса управления несоответствиями проведен анализ последствий выхода средств измерений из строя. Традиционная ошибка многих предприятий заключается в учете только прямых затрат на замену прибора, тогда как косвенные потери от его скрытой неисправности могут на порядки превышать стоимость нового оборудования [3].

Последствия разделены на две категории.

Прямые потери (обнаружение отказа при поверке или в процессе работы):

- стоимость приобретения нового средства измерения (аналога);
- затраты на демонтаж неисправного и монтаж нового оборудования (включая работу персонала и необходимые материалы);
- стоимость пусконаладочных работ и внеочередной поверки (или калибровки) нового прибора;
- транспортные расходы и затраты на утилизацию вышедшего из строя оборудования.

Косвенные потери (при скрытом отказе, когда прибор продолжает работать, но с недопустимой погрешностью):

–перерасход или неучтенный расход ресурса (оплата энергоресурсов (газа, тепла, воды) по нормативам, а не по факту, что может привести либо к прямым убыткам (переплата), либо к штрафам за безучетное потребление);

–затраты на внеплановую диагностику системы (поиск несуществующей утечки или засора, вызванный тем, что показания прибора не соответствуют ожидаемым);

–потери от снижения производительности (нестабильная работа регуляторов из-за неверных данных датчика может приводить к колебаниям параметров технологического процесса, снижению качества продукции, увеличению удельных норм расхода сырья);

–риск аварии (в системах, работающих под давлением, скрытый отказ датчика может привести к созданию аварийной ситуации, затраты на ликвидацию которой (ремонт, штрафы, простои, выплаты пострадавшим) являются максимальными).

Количественная оценка показывает, что косвенные потери за один месяц эксплуатации прибора с недопустимой погрешностью могут превысить стоимость нового прибора в 5–10 раз. Это служит убедительным аргументом для перехода от пассивного ожидания поверки к активному управлению рисками [4].

Процесс управления несоответствующей работой можно представить в виде последовательности, приведенной на рисунке 1.

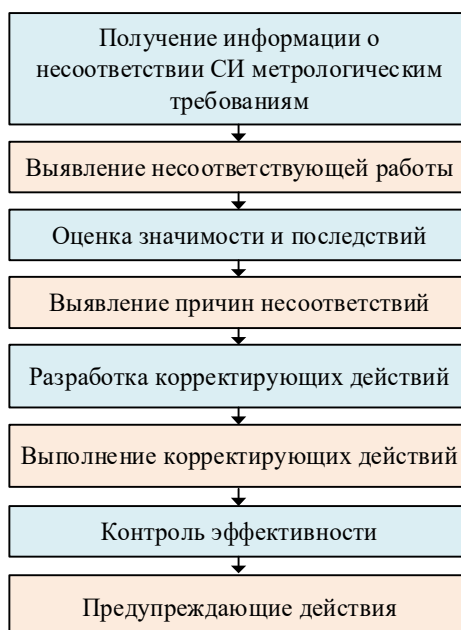


Рис. 1. Процесс управления несоответствующей работой

В качестве решения проблемы скрытых отказов средств измерений в межповерочный интервал предложено несколько вариантов.

1 Сохранение существующей системы (базовый вариант). Никаких изменений, реакция только по факту выявления неисправности при поверке. Самый дешевый в краткосрочной перспективе, но с максимальным уровнем риска.

2 Ужесточение регламентов технического обслуживания (ТО). Введение дополнительных регламентных работ: ежемесячный визуальный осмотр, проверка креплений, сравнительный анализ показаний с соседними приборами. Умеренные затраты, хороший потенциал обнаружения.

3 Внедрение системы дублирования. Установка второго (резервного) преобразователя параллельно основному в наиболее ответственных узлах (учет и регулирование). Оперативный персонал получает возможность сравнивать показания двух независимых приборов. Высокие капитальные затраты, но максимальная эффективность обнаружения.

4 Комбинированное решение (ТО + Дублирование). Одновременное усиление регламентов ТО и установка резервных датчиков на самых критичных участках.

5 Внедрение автоматической диагностики. Использование программного обеспечения для анализа трендов, выявления «зависаний» сигнала, резких скачков. Требуется модернизация системы сбора данных и АСУ ТП.

Анализ по критериям «затраты-эффективность» показал следующие результаты:

Вариант №2 (ТО) дает хороший эффект при низких затратах, но не решает проблему скрытых внутренних отказов электроники.

Вариант №3 (Дублирование) максимально эффективен, но дорог для тотального внедрения.

Вариант №5 (Автоматизация) эффективен, но требует длительного времени и значительных инвестиций в инфраструктуру.

Наиболее сбалансированным решением, сочетающим приемлемую стоимость и высокую эффективность, признано комбинированное решение (Вариант 4): внедрение системы дублирования на критически важных узлах в сочетании с ужесточением регламентов технического обслуживания на всех остальных.

Обоснование выбора:

1 Принцип Парето (80/20). 80% критических рисков сосредоточены на 20% оборудования (узлы учета и регулирования). Дублирование применяется точно – только на этих 20%, что минимизирует затраты [5].

2 Повышение обнаруживаемости (D). Дублирование позволяет выявлять отказы немедленно при расхождении показаний двух приборов. Усиленное ТО повышает шансы обнаружить внешние проблемы.

3 Умеренные затраты. Капитальные затраты на закупку датчиков для дублирования компенсируются предотвращением косвенных потерь.

Внедрение разработанного процесса управления несоответствующей работой и предложенного комплекса мероприятий позволит достичь следующих результатов:

Метрологическая надежность. Обеспечение соответствия показаний приборов учета фактическому расходу ресурса. Это исключает претензии со стороны контролирующих органов и поставщиков, а также гарантирует достоверность внутреннего учета.

Технологическая стабильность. Поддержание ключевых параметров технологического процесса на заданном уровне благодаря тому, что регуляторы получают достоверные данные от датчиков. Исключаются необоснованные колебания давления, расхода, температуры.

Оперативность реагирования. Межповерочный интервал перестает быть «слепой зоной». Система дублирования позволяет выявить отказ в течение смены, а не через год. Это переводит процесс из реактивного в проактивный режим.

Экономическая эффективность. Исключение непредвиденных расходов, связанных с оплатой ресурсов по нормативам, внеплановыми ремонтами и простоями оборудования.

Промышленная безопасность. Снижение риска возникновения аварийных ситуаций за счет достоверного контроля давления в газопроводах и других критических параметров. Обеспечение безопасности функционирования всей сети газопотребления предприятия.

Практическая значимость работы заключается в возможности масштабирования разработанной методологии на различные типы производств, использующих критически важное контрольно-измерительное оборудование.

Библиографический список

1. Федеральный закон № 102-ФЗ : [принят Государственной Думой 11 июня 2008 года : одобрен Советом Федерации 18 июня 2008 года]. – Москва : Кремль, 2008. 20 с.
2. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2015. 29 с.

3. Пылькин А. Н., Тишкина В. В. Информационная система формирования управленческих решений по улучшению текущего состояния объекта управления / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 91. С. 76-86.

4. Абрамов А.М. Анализ эффективности метода метрологического испытания при вычислении интегральной нелинейности АЦП / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 90. С. 133-143.

5. 10. Казаков О.Д. Оценка эффективности работы технологического оборудования по данным киберфизического уровня цифровых двойников бизнес-процессов дискретного производства // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 177-186.

УДК 658.562.012.7; ГРНТИ 81.81.17

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕСЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ В СТРУКТУРУ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ГРАФОВ

А.О. Рамазанов

*Казанский национально исследовательский технический университет - КАИ им. А.Н.Туполева
Россия, Казань arslanazbuka@gmail.com*

Аннотация. В статье рассматривается применение аппарата теории графов и сетей Петри для оптимизации процесса управления изменениями конструкторской и технологической документации на авиастроительном предприятии. Опираясь на классические и современные исследования в области дискретной математики и имитационного моделирования, построена формальная модель, описывающая жизненный цикл извещения об изменении. Модель включает параллельные ветки конструкторской и технологической подготовки, а также этапы производства и приемки. Проведенный анализ выявил критические узкие места и ресурсные конфликты в существующем регламенте. Предложены рекомендации по реинжинирингу процесса на основе полученных аналитических данных, что позволяет сократить производственный цикл и повысить эффективность использования ресурсов.

Ключевые слова: сеть Петри, теория графов, управление изменениями, авиастроение, имитационное моделирование, оптимизация бизнес-процессов, PDM-системы.

IMPROVING THE EFFECTIVENESS OF CHANGING THE STRUCTURE OF PRODUCTS BASED ON GRAVITY THEORY

A.O. Ramazanov

*Kazan National Research Technical University - KAI named after A.N. Tupolev
Russia, Kazan arslanazbuka@gmail.com*

Abstract. The article discusses the application of graph theory and Petri net theory to optimize the process of managing changes to design and technological documentation at an aircraft manufacturing enterprise. Based on classical and modern research in the fields of discrete mathematics and simulation modeling, a formal model has been developed to describe the lifecycle of a change notice. The model includes parallel branches of design and technological preparation, as well as production and acceptance stages. The analysis has identified critical bottlenecks and resource conflicts in the existing regulations. Recommendations for process reengineering based on the obtained analytical data have been proposed, which allows for reducing the production cycle and increasing resource efficiency.

Keywords: Petri net, graph theory, change management, aircraft engineering, simulation modeling, business process optimization, and PDM systems.

В условиях современного авиастроения, характеризующегося высокой сложностью изделий и жесткими требованиями к качеству, процесс внесения изменений в конструкцию является критически важным. Участие множества служб (конструкторский отдел, технологическое бюро, отдел снабжения, ОТК, представители заказчика) порождает сложные логистические и информационные связи. Задержки на любом из этапов могут привести к срыву производственного цикла. Для анализа и оптимизации таких сложных систем, где одновре-

менно протекают параллельные и асинхронные процессы, эффективно использовать математический аппарат теории графов, в частности, сети Петри [1].

Теоретические основы: графы и сети Петри

Теория графов является мощным инструментом дискретной математики. Граф представляет собой совокупность двух множеств: вершин и ребер, соединяющих эти вершины. В контексте моделирования процессов вершины могут обозначать состояния системы, а ребра – переходы между ними.

Развитием этой концепции стали сети Петри, предложенные Карлом Петри в 1962 году. Сеть Петри – это двудольный ориентированный граф, состоящий из элементов двух типов: позиций (P) и переходов (T). [2] Графически позиции изображаются кругами, а переходы – прямоугольниками или планками.

Формально, сеть Петри, определяется как пятерка компонентов, представленной в формуле (1):

$$C = (P, T, I, O, M_0), \quad (1)$$

где $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ – конечное множество позиций (условий, состояний, ресурсов);

$T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ – конечное множество переходов (событий, действий);

$I: T \rightarrow P^\infty$ – входная функция (отображение переходов в мультимножество позиций);

$O: T \rightarrow P^\infty$ – выходная функция (отображение переходов в мультимножество позиций);

M_0 – начальная маркировка сети (распределение фишек в позициях).

Динамика системы моделируется путем срабатывания переходов. Переход может сработать, если во всех его входных позициях есть хотя бы по одной фишке. При срабатывании перехода фишки изымаются из входных позиций и добавляются в выходные. Это свойство позволяет моделировать параллельные процессы, синхронизацию потоков и конфликты за ресурсы, что особенно актуально для авиастроительных производств. Применение сетей Петри в производственных системах, включая гибкие производственные модули, где подчеркивается их эффективность для анализа дискретных процессов. [3]

Построение модели процесса внесения изменений

Объектом моделирования выбран процесс внесения изменений в структуру изделия (на примере агрегата планера) на авиастроительном предприятии. В процессе участвуют: Инженер-конструктор (ИК), Начальник КБ (НКБ), Технолог (Т), Главный конструктор (ГК), Главный технолог (ГТ), Представитель заказчика (ПЗ), Начальник ОТК (ОТК).

Дан классический процесс внесения изменения в структуру изделия:

1. Получение письма от заказчика.
2. Формирование по письму извещения.
3. Подписание извещений у производства и ответственных.
4. Вносим изменения в составе.
5. Оповещаем об изменении в составе ответственных лиц.
6. Обновляем в PDM системе состав.
7. Закладываем материал для изделия.
8. Составляем заявку по материалу у ОМТС.
9. Контролируем последовательность выполнения операций на производстве.
10. Приемка изделия заказчиком.

Представим и визуализируем данный процесс с помощью сетей Петри.

На основе регламента предприятия построена сеть Петри (рис.1.) включающая следующие позиции и переходы.

Позиции (Состояния и ресурсы):

P_1 : Письмо заказчика с требованиями по изменению получено.

P_2 : Инженер-конструктор свободен.

P_3 : Начальник КБ свободен.

P_4 : Извещение об изменении сформировано.

P_5 : Извещение подписано ГК, ГТ и ПЗ (прошло согласование).

P_6 : Изменения в электронную структуру изделия (PDM) внесены.

P_7 : Технолог свободен.

P_8 : Технологический процесс разработан (материал заложен, операции утверждены).

P_9 : Заявка в отдел материально-технического снабжения (ОМТС) сформирована.

P_{10} : Изделие изготовлено и прошло контроль ОТК.

P_{11} : Комиссия по приемке (ГК, ГТ, ПЗ, ОТК) в сборе.

P_{12} : Акт приемки подписан (процесс завершен).

Переходы (Действия):

T_1 : Формирование извещения инженером.

T_2 : Цикл подписания извещения (последовательное прохождение ГК, ГТ, ПЗ).

T_3 : Внесение изменений в PDM и оповещение технологов производства.

T_4 : Разработка техпроцесса технологом.

T_5 : Формирование заявки в ОМТС инженером.

T_6 : Запуск и контроль производства.

T_7 : Финальная приемка продукции комиссией.

Графически сеть представляет собой ориентированный граф (рис. 1), где потоки после перехода T_3 разделяются на параллельные ветки (конструкторская фиксация изменений и технологическая подготовка), которые затем синхронизируются в переходе T_6 . Аналогичный подход к формализации процессов технологической подготовки производства на авиастроительных предприятиях ранее был предложен в работе. [4]

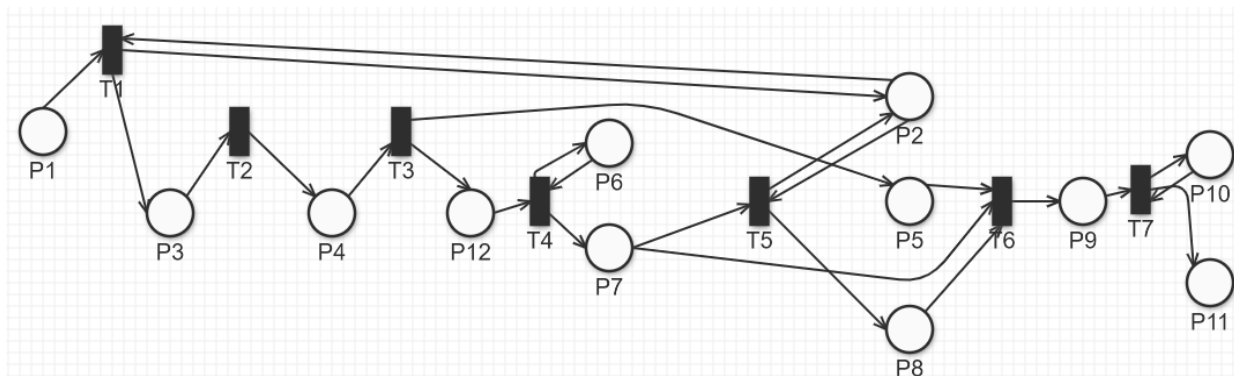


Рис.1. Сети Петри

Анализ результатов моделирования и выявление узких мест

Имитационное моделирование (расчет маркировок) на построенной сети Петри позволило сделать ряд важных выводов об эффективности процесса. Следуя методологии, описанной в современных исследованиях по управлению ресурсными параметрами [5], был проведен анализ динамики изменения маркировок.

1. Выявление точки синхронизации как критического пути.

Переход T_6 (Производство) требует одновременного наличия фишек в P_5 (изменения внесены), P_7 (технология готова) и P_8 (заявка отправлена). Согласно модели, время ожидания в T_6 определяется самой медленной из трех предшествующих ветвей. Анализ показал, что чаще всего задержки возникают на ветке P_7 (разработка технологии), если технолог P_6 занят

в нескольких параллельных проектах. Это подтверждает, что сети Петри эффективно выявляют узкие места в параллельных системах.

2. Обнаружение ресурсного конфликта.

Позиция P_1 (Инженер-конструктор) является входной сразу для трех переходов: T_1 (формирование извещения), T_3 (внесение изменений) и T_5 (формирование заявки). Это создает ситуацию "узкого горлышка". Если инженер занят на этапе T_3 , заявка в ОМТС T_5 не может быть сформирована вовремя, что останавливает производство на переходе T_6 . Данный конфликт является классическим примером проблемы разделения ресурсов.

3. Логическая коллизия в последовательности операций.

В ходе построения модели была выявлена ошибка в исходном регламенте. Формирование заявки в ОМТС T_5 зависит от готовности технологии P_7 , однако начальная версия регламента не учитывала времени поставки материала. В модель был добавлен гипотетический переход "Снабжение", что позволило формализовать наличие материальных ресурсов P_8 как обязательное условие для старта T_6 . Именно имитационное моделирование позволяет выявить такие скрытые логические несоответствия.

Пути улучшения процесса на основе модели

Полученные результаты позволяют предложить конкретные меры по реинжинирингу процесса внесения изменений:

1. Оптимизация ресурсного планирования. Для устранения конфликта вокруг позиции P_1 (инженер) рекомендуется ввести специализацию. Закрепить одних инженеров за внесением изменений в состав T_3 , а других - за формированием заявок в ОМТС T_5 . В терминах сети Петри это означает увеличение количества фишек в P_1 (найм сотрудников) или разделение одной позиции на две независимые (P_{1a} и P_{1b}).

2. Параллельное выполнение технологической подготовки. Модель показала, что запуск технолога T_4 происходит только после полного внесения изменений конструктором T_3 . Предлагается изменить регламент: разрешить технологу начинать разработку техпроцесса сразу после подписания извещения P_4 , не дожидаясь финального внесения изменений в PDM, если изменения касаются только замены материала, но не геометрии. Такой подход к параллельной организации работ обоснован в исследованиях по автоматизации технологической подготовки.

Применение теории графов, а именно сетей Петри, к процессу управления изменениями в авиастроении позволило создать наглядную и математически строгую модель документооборота. Модель успешно показала сложные логические связи между конструкторскими и технологическими службами, опираясь на методологию, в гибких производственных системах. В ходе анализа были выявлены скрытые узкие места: ресурсный конфликт инженеров, критическая зависимость производства от синхронизации трех потоков и логическое несоответствие в цикле заказа материалов. Предложенные корректировки, учитывающие специфику авиастроительного производства, позволят сократить общее время цикла внесения изменений и снизить риск простоев производства, что в конечном итоге повышает конкурентоспособность предприятия.

Библиографический список

1. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем : пер. с англ. / Дж. Питерсон. – Москва : Мир, 1984. – 264 с.
2. Котов, В. Е. Сети Петри / В. Е. Котов. – Москва : Наука, 1984. – 160 с.
3. Юдицкий, С. А. Конвейерные дискретные процессы и сети Петри / С. А. Юдицкий // Автоматика и телемеханика. – 1983. – № 6. – С. 141–147.

4. Ефимова, П. Е. Математическая модель автоматизированной системы управления заказами в процессе технологической подготовки производства на авиастроительных предприятиях / П. Е. Ефимова // Моделирование и анализ информационных систем. – 2010. – Т. 17, № 1. – С. 25–43.

5. Азарнова, Т. В. Применение инструментария временных сетей Петри для управления ресурсными параметрами проекта / Т. В. Азарнова, Ю. В. Бондаренко, Н. А. Поляков, О. А. Медведева // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2024. – № 4. – С. 102–115.

УДК 658.562.012.7; ГРНТИ 81.81.17

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ВЫЯВЛЕНИЕ УЗКИХ МЕСТ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОСНАСТКИ С ПОМОЩЬЮ СЕТИ ПЕТРИ

А.О. Рамазанов

*Казанский национально исследовательский технический университет - КАИ им. А.Н.Туполева
Россия, Казань arslanazbuka@gmail.com*

Аннотация. В статье рассматривается применение математического аппарата сетей Петри для моделирования процесса проектирования и согласования технологической оснастки. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности управления документооборотом в конструкторско-технологической подготовке производства. Представлена формальная модель, описывающая последовательность прохождения документа от получения технического задания до сдачи в архив с участием шести ключевых специалистов. Разработанная сеть Петри включает как поток документа, так и состояние ресурсов (занятость сотрудников), что позволяет проводить динамический анализ загрузки системы. На основе анализа маркировок сети Петри выявляются потенциальные «узкие места», приводящие к увеличению времени производственного цикла. Предложены рекомендации по оптимизации процесса на основе результатов моделирования.

Ключевые слова: сети Петри, визуализация процессов, проектирование оснастки, выявление узких мест, моделирование бизнес-процессов, конструкторско-технологическая подготовка производства, анализ загрузки ресурсов, документооборот, имитационное моделирование, оптимизация производственных процессов, согласование документации, жизненный цикл документа, анализ очередей.

VISUALIZATION AND IDENTIFICATION OF BURDEN POINTS IN THE PROCESS OF EQUIPMENT DESIGN USING THE PETRI NETWORK

A.O. Ramazanov

*Kazan National Research Technical University - KAI named after A.N. Tupolev,
Russia, Kazan arslanazbuka@gmail.com*

Abstract. The article discusses the application of the mathematical apparatus of Petri nets for modeling the process of designing and coordinating technological equipment. The relevance of this work is due to the need to improve the efficiency of document management in design and technological preparation of production. A formal model is presented that describes the sequence of document processing from receiving a technical assignment to submission to the archive, involving six key specialists. The developed Petri net includes both the flow of the document and the state of resources (employee availability), allowing for dynamic analysis of system load. Based on the analysis of the Petri net markings, potential bottlenecks are identified that lead to increased production cycle time. Recommendations for process optimization based on the simulation results are proposed.

Keywords: Petri nets, process visualization, tooling design, bottleneck identification, business process modeling, design and technological preparation of production, resource utilization analysis, document management, simulation modeling, optimization of production processes, documentation approval, document life cycle, queue analysis.

Проектирование технологической оснастки представляет собой сложный многостадийный процесс, включающий не только инженерную разработку, но и ряд обязательных проверок и утверждений. На пути от технического задания (ТЗ) до готового к производству чертежа документ последовательно проходит через руки нескольких специалистов: инжене-

ра-конструктора, начальника конструкторского бюро, нормоконтролера, главного конструктора, метролога и технолога. Завершается цикл передачей документа архивариусу для ввода в производство.

В современных условиях ключевой проблемой является длительность цикла согласования. Часто бывает сложно определить, на каком именно этапе документ простаивает дольше всего и кто из участников процесса перегружен. Традиционные блок-схемы фиксируют логику последовательности операций, но не позволяют проводить динамический анализ загрузки системы и выявлять узкие места при увеличении потока входящих задач.[1]

Теоретические основы: сети Петри

Эффективным инструментом для решения этой задачи являются сети Петри., предложенные Карлом Петри в 1962 году. Сеть Петри – это двудольный ориентированный граф, состоящий из элементов двух типов: позиций (P) и переходов (T).[2] Графически позиции изображаются кругами, а переходы – прямоугольниками или планками.

Формально, сеть Петри, определяется как пятерка компонентов, представленной в формуле (1):

$$C = (P, T, I, O, M_0), \quad (1)$$

где $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ – конечное множество позиций (условий, состояний, ресурсов);

$T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ – конечное множество переходов (событий, действий);

$I: T \rightarrow P^\infty$ – входная функция (отображение переходов в мультимножество позиций);

$O: T \rightarrow P^\infty$ – выходная функция (отображение переходов в мультимножество позиций);

M_0 – начальная маркировка сети (распределение фишек в позициях).

Динамика системы моделируется путем срабатывания переходов. Переход может сработать, если во всех его входных позициях есть хотя бы по одной фишке. При срабатывании перехода фишки изымаются из входных позиций и добавляются в выходные. Это свойство позволяет моделировать параллельные процессы, синхронизацию потоков и конфликты за ресурсы, что особенно актуально для авиастроительных производств. Применение сетей Петри в производственных системах, включая гибкие производственные модули, где подчеркивается их эффективность для анализа дискретных процессов.[3]

Построение модели процесса

Описание жизненного цикла процесса проектирования оснастки

Согласно техническому заданию, в процессе участвуют шесть ключевых специалистов, а жизненный цикл включает следующие этапы:

1. Начальник КБ получает техническое задание (инициация процесса).
2. Инженер-конструктор изучает ТЗ, проектирует оснастку и составляет чертеж.
3. Начальник КБ проверяет разработанный чертеж.
4. Нормоконтроль проверяет чертеж на соответствие стандартам и подписывает.
5. Главный конструктор утверждает документацию.
6. Метролог проверяет чертеж на соответствие нормам точности и подписывает.
8. Технолог утверждает документ и начинает разработку технологического процесса.
9. Архивариус принимает документ на хранение и вводит его в производство.

Представим и визуализируем данный процесс с помощью сети Петри (рис.1) включающей следующие позиции и переходы.

Позиции (Состояния и ресурсы)

P_1 : ТЗ у начальника КБ.

P_2 : Чертеж в работе у конструктора.

- P_3 : Чертеж на проверке у начальника КБ.
 P_4 : Чертеж у сотрудника ответственного за нормоконтроль.
 P_5 : Чертеж на утверждении у главного конструктора.
 P_6 : Чертеж у метролога.
 P_7 : Чертеж у технолога.
 P_8 : Документ в архиве.
 P_9 : Конструктор свободен.
 P_{10} : Начальник КБ свободен.
 P_{11} : Нормоконтролер свободен.
 P_{12} : Главный конструктор свободен.
 P_{13} : Метролог свободен.
 P_{14} : Технолог свободен.
 P_{15} : Архивариус свободен.

Переходы (Действия)

- T_1 : Выдать задание конструктору.
 T_2 : Разработать чертеж.
 T_3 : Проверить (начальник КБ).
 T_4 : Проверить нормоконтроль.
 T_5 : Утвердить (главный конструктор).
 T_6 : Проверить и подписать (метролог).
 T_7 : Утвердить и начать техпроцесс (технолог).
 T_8 : Принять в архив.

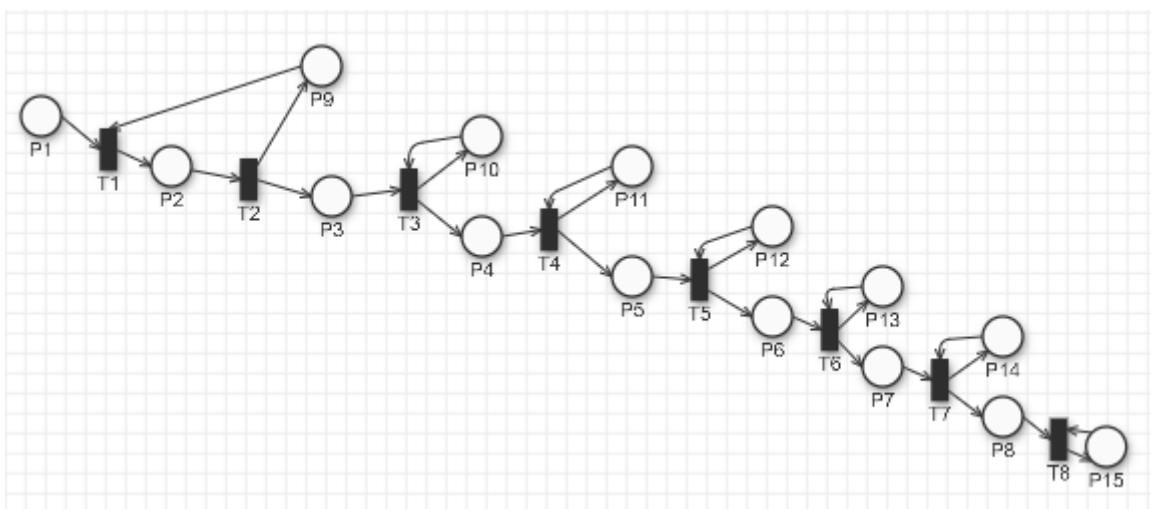


Рис. 1. Сети Петри

Анализ результатов моделирования и выявление узких мест

Наличие формальной модели позволяет провести анализ, направленный на выявление «узких мест» процесса. В терминах сетей Петри узкое место проявляется в виде накопления фишек в определенных позициях при интенсивном поступлении входных заявок или при ограниченной пропускной способности отдельных переходов [4].

Для выявления узких мест предлагается следующая методика.

Имитация множественных процессов.

В начальную позицию P_1 помещается несколько фишек (например, 5 или 10), моделирующих поступление пакета технических заданий. Запускается процесс функционирования сети.

Наблюдение за очередями.

В процессе движения фишек фиксируется их накопление в позициях, отражающих ожидание обработки ($P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7$).

Анализ динамики ресурсных позиций.

Отслеживается состояние позиций $P_9 - P_{15}$. Длительное отсутствие фишки в ресурсной позиции свидетельствует о постоянной занятости специалиста и наличии очереди заданий перед ним.[5]

Выявление критического пути. Определяется последовательность переходов, где время ожидания максимально.

Проведя анализ, рассмотрим возможные сценарии и их интерпретацию.

Сценарий 1. Накопление фишек в позиции P_3 :

Если в процессе моделирования фишки начинают накапливаться в позиции P_3 («Чертеж на проверке у начальника КБ»), это сигнализирует, что начальник КБ не справляется с потоком входящих документов. Переход T_3 срабатывает медленнее, чем поступают новые документы из T_2 . В терминах сетей Петри это может интерпретироваться как недостаточная пропускная способность перехода T_3 , связанная с ограниченностью ресурса (один начальник КБ).[6] Узкое место — начальник КБ.

Сценарий 2. Накопление фишек в позиции P_5 :

Если фишки скапливаются в позиции P_5 («Чертеж на утверждении у главного конструктора»), это указывает на то, что главный конструктор перегружен (например, занят совещаниями или другими задачами). Документы готовы к утверждению, но вынуждены ждать освобождения ресурса. Узкое место — главный конструктор.

Сценарий 3. Длительное отсутствие фишки в ресурсной позиции

Анализ ресурсных позиций дополняет картину. Например, если позиция P_{13} (метролог) большую часть времени пустует, это означает, что метролог постоянно занят, и документы накапливаются в очереди P_6 . Даже если скорость срабатывания T_6 формально высока, отсутствие свободного ресурса создает узкое место на входе. Узкое место — нехватка ресурса "метролог".

Библиографический список

1. Репин В.В., Елиферов В.Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. — М.: РИА «Стандарты и качество», 2004. — 408 с.
2. Котов, В. Е. Сети Петри / В. Е. Котов. — Москва : Наука, 1984. — 160 с.
3. Юдицкий, С. А. Конвейерные дискретные процессы и сети Петри / С. А. Юдицкий // Автоматика и телемеханика. — 1983. — № 6. — С. 141–147.
4. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. — СПб.: БХВ-Петербург, 2002. — 608 с.
5. Лукьянец С.В., Орда П.А. Анализ гибкого штамповочного производства с использованием имитационных моделей // Доклады БГУИР. — 2009. — № 6. — С. 47-53.
6. Ramchandani C. Analysis of Asynchronous Concurrent Systems by Timed Petri Nets. — MIT, 1974. — 120 p.

УДК 004.056:005.6; ГРНТИ 81.93.29

АНАЛИЗ СТАНДАРТОВ И ПРАКТИК ОЦЕНКИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ИТ-КОМПАНИЯХ

Н.Н. Ахметзянов

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н.Туполева (КНИТУ-КАИ),
Россия, Казань, 999.niyaz@bk.ru*

Аннотация. В статье рассматриваются основные подходы к оценке информационной безопасности в ИТ-компаниях, представленные в международных и российских стандартах и методических рекомендациях. Проанализированы положения стандартов серии ISO/IEC 27000, а также национальные стандарты ГОСТ Р ИСО/МЭК, регламентирующие мониторинг, измерение и оценку эффективности системы менеджмента информационной безопасности. Отдельное внимание уделено риск-ориентированным подходам и методическим рекомендациям NIST, ориентированным на использование количественных показателей и метрик информационной безопасности. Показано, что современные стандарты рассматривают оценку информационной безопасности, как системный управленческий процесс, обеспечивающий не только соответствие требованиям, но и повышение устойчивости бизнес-процессов ИТ-компаний.

Ключевые слова: информационная безопасность; СУИБ (система управления информационной безопасностью); ISO/IEC 27001; ISO/IEC 27004; метрики информационной безопасности; управление рисками; NIST; ГОСТ Р ИСО/МЭК.

ANALYSIS OF STANDARDS AND PRACTICES FOR ASSESSING INFORMATION SECURITY IN IT COMPANIES

N.N. Akhmetzyanov

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (KNRTU-KAI),
Kazan, Russia, 999.niyaz@bk.ru*

Abstract. The article examines the main approaches to assessing information security in IT companies as presented in international and Russian standards and methodological guidelines. The provisions of the ISO/IEC 27000 series standards, as well as the national GOST R ISO/IEC standards regulating the monitoring, measurement, and evaluation of the effectiveness of an information security management system (ISMS), are analyzed. Particular attention is given to risk-based approaches and NIST methodological recommendations focused on the use of quantitative indicators and information security metrics. It is shown that modern standards treat information security assessment as a systematic management process that ensures not only compliance with requirements but also enhances the resilience of IT companies' business processes.

Keywords: information security; ISMS; ISO/IEC 27001; ISO/IEC 27004; information security metrics; risk management; NIST; GOST R ISO/IEC.

В условиях цифровизации экономики и роста зависимости организаций от информационных технологий вопросы информационной безопасности приобретают стратегическое значение. Для ИТ-компаний защита информации выступает не только как совокупность технических мер, но и как управляемый процесс, влияющий на устойчивость бизнес-процессов, качество предоставляемых услуг и уровень доверия со стороны клиентов и партнёров. В этой связи особую актуальность приобретает задача оценки состояния и эффективности информационной безопасности на основе формализованных и сопоставимых подходов.

Методологической основой оценки информационной безопасности в международной практике являются стандарты серии ISO/IEC 27000. Ключевым документом данной серии является стандарт ISO/IEC 27001, определяющий требования к системе менеджмента информационной безопасности. В рамках данного стандарта информационная безопасность трактуется как обеспечение конфиденциальности, целостности и доступности информации, а управление ею рассматривается как непрерывный цикл планирования, внедрения, контроля и улучшения процессов защиты [1]. В российской практике положения данного стандарта воспроизведены в ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001-2021 [2]. Терминологическую и концептуальную

основу серии формирует стандарт ISO/IEC 27000, обеспечивающий единое понимание ключевых понятий в области информационной безопасности [3].

Практическая реализация требований ISO/IEC 27001 предполагает необходимость регулярного мониторинга и оценки результативности системы менеджмента информационной безопасности. Эти аспекты подробно раскрываются в стандарте ISO/IEC 27004, который устанавливает принципы мониторинга, измерения, анализа и оценки эффективности мер информационной безопасности. В документе подчёркивается, что организация должна разрабатывать систему измерений, позволяющую оценивать достижение целей в области информационной безопасности и эффективность реализуемых процессов управления рисками [4]. В российской практике положения стандарта воспроизведены в ГОСТ Р ИСО/МЭК 27004-2021, что обеспечивает сопоставимость международных и национальных подходов [5]. Следует отметить, ISO/IEC 27004 имеет прикладное назначение и прямо ориентирован на выполнение требований ISO/IEC 27001 в части оценивания исполнения (п. 9.1 “monitoring, measurement, analysis and evaluation”). В этом смысле ISO/IEC 27004 задаёт методическую рамку построения измерений в СУИБ и фиксирует три взаимосвязанных уровня:

(а) мониторинг и измерение производительности (performance) информационной безопасности;

(б) мониторинг и измерение эффективности системы менеджмента информационной безопасности, включая её процессы и контроли;

(в) анализ и оценивание результатов мониторинга и измерений для последующей управленческой интерпретации и улучшений.

В целом данный подход переводит оценку ИБ из набора разрозненных метрик в управляемую программу измерений, обеспечивая связку “цель → показатель → данные → управленческий вывод → корректирующее действие”.

Существенным элементом системы оценки информационной безопасности является риск-ориентированный подход. Он подробно раскрыт в стандарте ISO/IEC 27005, посвящённом управлению рисками информационной безопасности. В соответствии с данным стандартом оценка ИБ должна учитывать вероятность реализации угроз и потенциальные последствия инцидентов, что позволяет выстраивать приоритеты защитных мероприятий и формировать обоснованную систему показателей [6]. Дополнительные рекомендации по оценке мер обеспечения информационной безопасности в рамках аудита и контроля соответствия требованиям представлены в стандарте ISO/IEC TS 27008, принятом в Российской Федерации в виде ГОСТ Р ИСО/МЭК 27008-2021 [7,8].

Наряду со стандартами ISO/IEC, значительное влияние на практику оценки информационной безопасности оказывают методические рекомендации Национального института стандартов и технологий США (NIST). В актуальной редакции подходы к измерению и применению метрик представлены в серии NIST SP 800-55 “Measurement Guide for Information Security”, включающей тома Volume 1 (идентификация и отбор мер) и Volume 2 (разработка программы измерений) [9,10]. В Volume 1 акцентируется связь показателей с информационными потребностями и целями организации, а также описываются процедуры приоритизации и оценивания качества мер (в том числе их интерпретируемости и полезности для управленческих решений) при оценке адекватности политик, процедур и контролей. В Volume 2 метрики рассматриваются как элемент формализованной программы измерений: закрепляются роли и ответственность, регламентируются сбор и анализ данных, устанавливаются правила интерпретации результатов и механизмы замыкания измерений на корректирующие действия и улучшение системы защиты.

Аналогичная прикладная логика поддерживается и в других документах NIST, в частности в каталоге контролей SP 800-53, который позволяет строить метрики как инструменты мониторинга результативности и зрелости конкретных групп контролей в рамках риск-ориентированного управления [11]. Для повышения достоверности таких метрик их целесо-

образно дополнять процедурами оценки (assessment) контролей по NIST SP 800-53A, которые согласованы с SP 800-53 и позволяют подтверждать фактическое внедрение и достижение целей контролей, а не ограничиваться формальной фиксацией “pass/fail” [12].

Если сопоставить рассмотренные документы, можно увидеть, что каждый из них закрывает свой участок общей процедуры оценки. ISO/IEC 27001 формирует требования к СУИБ и задаёт логику постоянного улучшения, ISO/IEC 27004 описывает, как организовать мониторинг и измерения результативности, ISO/IEC 27005 обеспечивает риск-ориентированную основу для выбора приоритетов и показателей, а ISO/IEC TS 27008 уточняет подходы к оцениванию мер (контролей) при проверках и аудитах. Рекомендации NIST дополняют эту систему прикладными принципами разработки метрик и их увязки с управленческими решениями — то есть помогают перевести результаты измерений в практические действия.

Представим сопоставительную классификацию стандартов и методических рекомендаций, применяемых для мониторинга, измерения и оценивания информационной безопасности, в таблице 1.

Таблица 1. Сопоставление роли стандартов ISO/IEC и рекомендаций NIST в контуре мониторинга, измерения и оценивания информационной безопасности

Документ	Фокус	Что измеряем/проверяем	Тип результата	Как используется в работе
ISO/IEC 27001	требования к СУИБ	соответствие требованиям СУИБ	требования/рамка	задаёт контур управления
ISO/IEC 27004	программа измерений (measurement program)	Результативность ИБ / эффективность СУИБ + анализ и оценка (performance/ISMS effectiveness + analysis/evaluation)	KPI/метрики + интерпретация	основа системы показателей
ISO/IEC 27005	управление рисками (risk management)	риски: вероятность/ущерб	риск-профиль	обоснование приоритетов показателей
ISO/IEC TS 27008	оценивание мер/контролей (assessment of controls)	внедрение/функционирование контролей	результаты проверки/аудита	верификация “что реально работает”
NIST SP 800-55	руководство по измерению (measurement guide)	выбор мер + программа измерений	методика KPI	прикладная “инженерия” метрик

В отличие от прикладных публикаций, фокусирующихся на включении показателей информационной безопасности в систему KPI, стандарты и методические руководства формируют общую логику и структуру оценочных процедур. Они ориентируют организации на построение целостной системы измерений, охватывающей технические, процессные и управленческие аспекты информационной безопасности. Такой подход позволяет не только оценивать соответствие требованиям стандартов, но и анализировать зрелость процессов информационной безопасности, что широко применяется в практике аудита и консалтинга [13].

Таким образом, анализ международных и российских стандартов и рекомендаций показывает, что оценка информационной безопасности в IT-компаниях должна основываться на системном и риск-ориентированном подходе. Использование стандартов ISO/IEC, национальных аналогов ГОСТ Р ИСО/МЭК и методологий NIST создаёт методологическую основу для разработки программ измерений, мониторинга и анализа эффективности, обеспечивая условия для интеграции информационной безопасности в общую систему управления деятельностью IT-компаний.

Библиографический список

1. *ISO/IEC 27001:2022*. Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security management systems — Requirements. Geneva: ISO, 2022.
2. *ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001-2021* Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования, 2021. — 28 с. — Статус: действующий.
3. *ISO/IEC 27000:2018*. Information technology — Security techniques — Information security management systems — Overview and vocabulary. Geneva: ISO, 2018.
4. *ISO/IEC 27004:2016*. Information security management — Monitoring, measurement, analysis and evaluation. Geneva: ISO, 2016.
5. *ГОСТ Р ИСО/МЭК 27004-2021* Информационные технологии. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент информационной безопасности. Мониторинг, оценка защищенности, анализ и оценивание, 2021. — 50 с. — Статус: действующий.
6. *ISO/IEC 27005:2018*. Information technology — Security techniques — Information security risk management. Geneva: ISO, 2018.
7. *ISO/IEC TS 27008:2019*. Information technology — Security techniques — Guidelines for the assessment of information security controls. Geneva: ISO, 2019.
8. *ГОСТ Р ИСО/МЭК 27008-2021*. Информационные технологии. Методы и средства обеспечения безопасности. Руководство по оценке мер информационной безопасности. М.: Стандартинформ, 2021.
9. *NIST*. Measurement Guide for Information Security. Volume 1 — Identifying and Selecting Measures : NIST Special Publication 800-55, v1. — Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2024. — URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-55v1.pdf> (дата обращения: 20.02.2026).
10. *NIST*. Measurement Guide for Information Security. Volume 2 — Developing a Measurement Program : NIST Special Publication 800-55, v2. — Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2024. — URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-55v2.pdf> (дата обращения: 20.02.2026).
11. *NIST SP 800-53 Rev. 5*. Security and Privacy Controls for Information Systems and Organizations. Gaithersburg: NIST, 2020.
12. *NIST*. Assessing Security and Privacy Controls in Information Systems and Organizations : NIST Special Publication 800-53A, Rev. 5. — Gaithersburg : NIST, 2022. — URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-53Ar5.pdf> (дата обращения: 26.02.2026).
13. *Whitman M.E., Mattord H.J.* Principles of Information Security. 6th ed. Boston: Cengage Learning, 2018.

УДК 004.056:005.52; ГРНТИ 06.81.12

ПОКАЗАТЕЛИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СИСТЕМЕ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИТ-КОМПАНИИ

Н.Н. Ахметзянов

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н.Туполева (КНИТУ-КАИ),
Россия, Казань, 999.niyaz@bk.ru*

Аннотация. В статье рассматриваются подходы к формированию показателей информационной безопасности в системе ключевых показателей эффективности (КПИ) ИТ-компаний. Показано, что показатели информационной безопасности целесообразно включать в единую систему оценки результативности организации. Рассмотрены положения ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001 и ГОСТ Р ИСО/МЭК 27004-2021, а также практические подходы к измерению и мониторингу в рекомендациях NIST и ITIL. Сформирована прикладная классификация КПИ ИБ, ориентированная на использование в ИТ-компаниях.

Ключевые слова: информационная безопасность, КПИ, ИСО 27001, ИСО 27004, эффективность деятельности, ИТ-компания.

INFORMATION SECURITY INDICATORS IN THE SYSTEM OF KEY PERFORMANCE INDICATORS OF AN IT COMPANY

N.N. Akhmetzyanov

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (KNRTU-KAI),
Kazan, Russia, 999.niyaz@bk.ru*

Abstract. The article examines approaches to the formation of information security indicators within the system of key performance indicators (KPI) of an IT company. The necessity of integrating information security metrics into the overall organizational performance evaluation system is substantiated. The requirements of the standards GOST R ISO/IEC 27001 and GOST R ISO/IEC 27004-2021, as well as the recommendations of NIST and ITIL related to the measurement and monitoring of information security processes, are analyzed. A classification of information security KPIs focused on practical application in IT companies is proposed.

Keywords: information security, KPI, ISO 27001, ISO 27004, organizational performance, IT company.

В современных IT-компаниях информационная безопасность является неотъемлемым элементом обеспечения устойчивости бизнес-процессов и качества предоставляемых услуг. Рост объёмов цифровых данных, распространение облачных технологий и увеличение числа киберинцидентов приводят к необходимости системного управления рисками информационной безопасности и их постоянного мониторинга [1].

Традиционные системы оценки эффективности деятельности организаций, как правило, основываются на финансовых и операционных показателях. Однако для IT-компаний подобный подход является недостаточным, поскольку ключевые активы носят нематериальный характер и напрямую связаны с информацией и информационными системами [2]. В этой связи возникает необходимость включения показателей информационной безопасности в систему ключевых показателей эффективности (KPI).

Российские стандарты серии ИСО/МЭК 27000 подчёркивают важность измеримости процессов информационной безопасности и оценки их результативности [3, 4]. Вместе с тем, на практике многие организации сталкиваются с трудностями при выборе и интерпретации соответствующих показателей, а также при их увязке с общими целями компании.

В работе анализируются подходы к формированию показателей информационной безопасности в системе KPI IT-компаний и рассматривается их роль в управлении эффективностью организации. В этом контексте информационная безопасность рассматривается не только как совокупность технических мер защиты, но и как один из факторов, влияющих на устойчивость и результативность деятельности компании.

Согласно стандарту ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001, информационная безопасность определяется как сохранение конфиденциальности, целостности и доступности информации [3]. Для обеспечения этих характеристик в организации формируется система управления информационной безопасностью (СУИБ), которая основывается на процессном и риск-ориентированном подходах.

Важным элементом СУИБ является мониторинг и анализ её результативности. Стандарт ГОСТ Р ИСО/МЭК 27004 прямо указывает на необходимость использования измеримых показателей для оценки эффективности мер информационной безопасности и процессов управления рисками [4]. Таким образом, показатели ИБ выступают инструментом управленческого контроля, а не исключительно техническими метриками.

Для IT-компаний показатели информационной безопасности тесно связаны с качеством ИТ-услуг, выполнением соглашений об уровне сервиса (SLA) и поддержанием доверия со стороны клиентов, что также отражено в практиках ITIL 4 [5]. В этой связи в научной и практической литературе сформировались различные подходы к формированию KPI в области информационной безопасности, ориентированные на разные аспекты управления.

Наиболее распространённым является процессный подход, предполагающий оценку результативности ключевых процессов ИБ, поскольку он напрямую соотносится с регламен-

тированными процедурами СУИБ и ITSM и опирается на данные операционного учета, что упрощает регулярное измерение и управленческую интерпретацию показателей [5].

Риск-ориентированный подход основан на оценке вероятности и последствий инцидентов информационной безопасности. Данный подход широко используется в рекомендациях NIST и в методологии FAIR (Factor Analysis of Information Risk), где риски ИБ переводятся в количественные показатели [6, 7].

Подход, основанный на соответствии требованиям, ориентирован на оценку выполнения требований стандартов, внутренних политик и регламентов, что соответствует логике аудита СУИБ по ИСО/МЭК 27001 [3].

Комбинирование указанных подходов позволяет сформировать сбалансированную систему KPI, отражающую как техническое состояние защиты информации, так и её влияние на деятельность компании. Практическая реализация такой системы предполагает использование совокупности показателей, охватывающих ключевые аспекты управления информационной безопасностью.

На основе анализа стандартов и практических рекомендаций можно выделить следующие группы показателей информационной безопасности:

- количество инцидентов информационной безопасности за отчётный период [3, 6];
- среднее время обнаружения и реагирования на инциденты (MTTD, MTTR) [5];
- доля устранённых критических уязвимостей в установленный срок [4];
- процент выполнения требований политики информационной безопасности [3];
- количество нарушений прав доступа и ошибок управления учётными записями [6];
- доля сотрудников, прошедших обучение по информационной безопасности [4].

Представим классификацию показателей информационной безопасности в таблице 1.

Таблица 1. Классификация KPI информационной безопасности для IT-компаний

Группа KPI	Управленческий смысл	Примеры показателей
Инциденты и реагирование	Контроль устойчивости сервисов и эффективности реагирования	Количество инцидентов; MTTD/MTTR; доля инцидентов, закрытых в SLA; повторяемость инцидентов
Уязвимости и техническая защищённость	Контроль профилактики и «гигиены» инфраструктуры	Доля критических уязвимостей, устранённых в срок; средний срок устранения; доля активов с актуальными обновлениями
Доступ и учетные записи	Предотвращение нарушений прав доступа и ошибок управления	Количество нарушений прав доступа; доля учетных записей без владельца; частота выявления избыточных прав
Соответствие требованиям	Управляемость регламентов и зрелость СУИБ	Процент выполнения требований политики ИБ; результаты внутренних проверок; доля корректирующих действий, выполненных в срок
Обучение и культура ИБ	Снижение человеческого фактора	Доля сотрудников, прошедших обучение; результаты тестирования; доля подразделений с 100% охватом
Риск-ориентированные KPI	Связь ИБ с устойчивостью бизнеса	Доля рисков выше порога; динамика совокупного риска; доля рисков с реализованными мерами обработки

Представленная классификация позволяет использовать KPI в логике «сквозного» управления: технические и процессные индикаторы интерпретируются через влияние на качество и устойчивость IT-услуг. Практически это означает, что показатели ИБ могут включаться в управленческую отчетность наряду с KPI доступности сервисов, показателями каче-

ства обслуживания и финансовыми метриками, обеспечивая единую картину результативности деятельности компании.

В качестве иллюстрации управленческой интерпретации можно рассмотреть показатели MTTR и соблюдения SLA. Так, рост среднего времени реагирования/восстановления (MTTR) при одновременном увеличении доли инцидентов, закрытых с нарушением SLA, указывает на риск снижения доступности IT-услуг и невыполнения обязательств перед клиентами. В управленческом контуре это может приводить к решениям о перераспределении ресурсов дежурной смены, усилении мониторинга и автоматизации оповещения (алертинга), а также пересмотре регламентов эскалации и постинцидентного анализа. Связка “скорость восстановления — выполнение SLA” является типовой для практик управления инцидентами и измерения устойчивости сервисов.

Данные показатели могут использоваться как в абсолютном выражении, так и в виде относительных значений. Это позволяет сопоставлять результаты за различные периоды и принимать обоснованные управленческие решения. Их включение в систему KPI позволяет рассматривать информационную безопасность не как изолированную техническую функцию, а как значимый фактор, влияющий на общую эффективность деятельности IT-компании. Такой подход обеспечивает переход от качественного описания угроз к количественной оценке их воздействия на ключевые процессы и результаты.

Согласно исследованиям консалтинговых компаний PwC и Deloitte, зрелые системы измерения ИБ способствуют снижению потерь от инцидентов и повышению устойчивости бизнес-процессов [8, 9].

Российская и международная практика управления также подчёркивает целесообразность интеграции ИБ-метрик в управленческую отчётность. В частности, стремление компаний к сертификации по ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001 рассматривается как инструмент демонстрации зрелости системы управления информационной безопасностью и повышения доверия со стороны клиентов и партнёров.

Показатели информационной безопасности являются важным элементом системы ключевых показателей эффективности IT-компании. Использование KPI, сформированных на основе требований ISO/IEC 27001, ISO/IEC 27004 и рекомендаций NIST и ITIL, позволяет обеспечить измеримость процессов информационной безопасности и повысить обоснованность управленческих решений. Представленный подход может быть использован при разработке методики оценки эффективности деятельности IT-компаний.

Библиографический список

- 1 Whitman, M. E., Mattord, H. J. Principles of Information Security. – 6th ed. – Boston : Cengage Learning, 2018. – 768 p.
2. Laudon, K. C., Laudon, J. P. Management Information Systems: Managing the Digital Firm. – 16th ed. – Harlow : Pearson Education, 2020. – 704 p.
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001-2021 Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования, 2021. — 28 с. — Статус: действующий.
4. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27004-2021 Информационные технологии. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент информационной безопасности. Мониторинг, оценка защищенности, анализ и оценивание, 2021. — 50 с. — Статус: действующий.
5. ITIL® 4 Foundation. IT Service Management Framework. – London : AXELOS, 2019.
6. NIST Special Publication 800-53 Rev. 5. Security and Privacy Controls for Information Systems and Organizations. – Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology (NIST), 2020.
7. Hubbard, D. W., Seiersen, R. How to Measure Anything in Cybersecurity Risk. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2016. – 304 p.
8. PwC. Global Digital Trust Insights Survey. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.pwc.com/mu/en/services/consulting/global-digital-trust-insights.html> (дата обращения 20.01.2026)
9. Deloitte. Global Future of Cyber Survey. [Электронный ресурс]. – URL: <https://sitic.org/wordpress/wp-content/uploads/2023-Global-Future-of-Cyber-Survey.pdf> (дата обращения 20.01.2026)

УДК 658.5; ГРНТИ 59.01.81

АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Р.Ф. Низамова^{1,2}, А.Э. Тухватуллина^{1,2}

¹ ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им.Д.И.Менделеева»
Российская Федерация, Казань, r.f.nizamova@vniim.ru

² Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ,
Российская Федерация, Казань

Аннотация. В работе проведен обзор нормативных документов, содержащих описание процедуры анализа производства и их возможное применение в процессе испытаний средств измерений в целях утверждения типа. В рамках обзора проведена качественная оценка значимости критериев анализа производства, предложены пути оптимизации процесса анализа, которые позволяют регламентировать порядок проведения анализа, обеспечивая баланс интересов изготовителя СИ и испытателя, а также повышая объективность и качество результатов испытаний в данной области.

Ключевые слова: анализ производства, испытания средств измерений, система менеджмента качества, средства измерений

ANALYSIS OF PRODUCTION DURING TESTING OF MEASURING INSTRUMENTS

R.F. Nizamova^{1,2}, A.E. Tuhvatullina^{1,2}

¹ Affiliated Branch of the D.I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM-VNIIR)

² Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI

The summary. The paper provides a review of regulatory documents that describe the procedure for manufacturing analysis and their possible application in the process of testing measuring instruments for type approval. The review includes a qualitative assessment of the significance of manufacturing analysis criteria and suggests ways to optimize the analysis process, which helps to regulate the procedure for conducting analysis, ensuring a balance between the interests of the measuring instrument manufacturer and the tester, and improving the objectivity and quality of test results in this area.

Keywords: production analysis, testing of measuring instruments, quality management system, measuring instruments

В современном мире, где точность измерений является основой для работы во многих отраслях, например, в промышленности, надежность средств измерений (СИ) критически важна. От того, какие СИ выходят на рынок, зависит качество работ. В целях оценки качества СИ и подтверждения соответствия определенным требованиям проводятся разного рода испытания. В случае, когда оценивается соответствие СИ метрологическим требованиям, проводятся испытания СИ в целях утверждения типа. Однако истинная гарантия качества и долговечности СИ лежит не только в их испытаниях, но и в производственном процессе. Именно поэтому анализ производства при испытаниях СИ необходим при оценке их пригодности.

Традиционно, испытания СИ фокусируются на проверке СИ как готового продукта на соответствие заявленным характеристикам. Однако, СИ, которое, на первый взгляд, кажется качественным, может демонстрировать нестабильные или неудовлетворительные результаты, если в процессе его производства были допущены отклонения. Данная проблема особенно актуальна при испытаниях СИ серийного производства, когда необходимо провести выборку образцов из партии. Согласно ГОСТ Р 50779.51-95 [1] необходимо при выборе степени доверия также анализировать данные о стабильности производства. Например, в ситуациях, когда информация о производственной системе поставщика отсутствует, неполна или имеются сомнения в ее стабильности (что соответствует условию T1 в ГОСТ Р 50779.51-95), риск получения СИ, не соответствующего требованиям, максимален. В данном случае следует применять сплошной контроль (аналогично $\beta_0 = 0$), что означает необходимость детальной

проверки каждого образца СИ в ходе испытаний, включая все метрологические характеристики и функциональные возможности. Это наиболее затратный вариант.

Если у поставщика отсутствует сертификат на систему качества, но имеется сертифицированная продукция и удовлетворительный период поставок, например условие Т4, может быть интерпретировано как наличие определенных производственных процедур, но без полного доверия к их системности. Это соответствует риску потребителя $\beta_0 = 0,5$, что при испытаниях СИ может означать необходимость применения расширенной программы испытаний или выборки большего объема.

Наиболее предпочтительный вариант для испытаний СИ - когда производитель демонстрирует высокий уровень зрелости производственных процессов. Это подтверждается наличием сертификатов на систему качества, например, по ГОСТ Р ИСО 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования», а также надежной репутацией и положительным опытом поставок (условия Т6 и Т7). В таких случаях, риск потребителя может достигать $\beta_0 = 0,9$ или даже 1,0. Это подразумевает возможность сокращения объема или продолжительности испытаний, так как повышается вероятность того, что произведенные СИ будут соответствовать метрологическим требованиям без дополнительных проверок со стороны испытательной лаборатории.

Таким образом, анализ производства СИ при испытаниях может включать в себя оценку следующих факторов, которые коррелируют с уровнями доверия из Таблицы 1 ГОСТ Р 50779.51-95 [1]:

- наличие и статус сертификации СМК производителя (например, по ISO 9001);
- наличие сертификации на саму продукцию (СИ);
- история поставок (длительность сотрудничества, отсутствие претензий, положительные отзывы);
- стабильность производственных процессов (оценка технологической дисциплины, применение статистических методов управления процессами);
- репутация производителя на рынке.

Анализ производства также применяется при определении продолжительности интервалов между поверками СИ в соответствии с МИ 3676-2023 [2], где основной целью анализа производства является подтверждение того, что на предприятии созданы все необходимые условия для обеспечения постоянного (стабильного) соответствия серийно выпускаемых СИ тем требованиям, которые были установлены при утверждении их типа.

Объектами анализа являются:

- техническая документация (проектная, конструкторская, технологическая и эксплуатационная) на СИ, документированные процедуры, записи;
- опыт производства;
- ресурсы и инфраструктура: наличие эталонов, испытательного оборудования (ИО), состояние производственных площадок;
- персонал: компетентность сотрудников, отвечающих за производство и метрологический контроль;
- входной контроль сырья и комплектующих;
- соблюдение технологических процессов;
- приемочный контроль и периодические испытания готовой продукции;
- прослеживаемость, идентификация СИ, наличие системы маркировки и условий хранения.

В качестве основы для анализа состояния производства и СМК возможно применение ГОСТ Р 54293-2020 [3], который включает в себя различные аспекты, например, компетентность персонала, инфраструктура, ресурсы мониторинга и измерений, входной и приемочный контроль.

Проанализировав вышеперечисленные документы, можно выделить основные области оценки с оценкой сложности выполнения (табл.1). Сложность определена на основе объема анализируемой документации.

Таблица 1. Сравнительная таблица основных аспектов анализа производства

Критерий проверки	Что проверить	Сложность оценки
Анализ используемых материалов и комплектующих	Проверка сертификатов, входного контроля, условий хранения и использования критически важных материалов	Средняя
Прослеживаемость	Способность отследить партию материалов до конкретного СИ или партии СИ	Высокая
Стабильность и повторяемость	Анализ технологических карт, инструкций, соблюдения температурных режимов, давлений, чистоты помещений, времени выдержки и других параметров, влияющих на метрологические характеристики	Высокая
Автоматизация и ручные операции	Оценка рисков, связанных с человеческим фактором при ручных операциях, и эффективности автоматизированных систем	Высокая
Квалификация и обучение персонала	Оценка квалификации персонала, задействованного в производстве СИ, особенно на критически важных участках, наличие программ обучения, аттестации и повышения квалификации, направленных на поддержание необходимых компетенций	Средняя
Система контроля качества на производстве	Анализ наличия и эффективности промежуточного и межоперационного контроля на всех стадиях производства	Высокая
Условия производственной среды	Оценка соответствия условий производственной среды	Средняя
Наличие СМК	Есть ли СМК, сертифицировано ли оно	Низкая

Исходя из анализа, представленного в таблице 1, не каждый этап возможно оценить испытателю без потерь времени. Соответственно, возникает необходимость оценки значимости данных критериев с целью оптимизация работы при испытаниях в целях утверждения, как, например, на рисунке 1.



Рис. 1. Градация критериев проверки по значимости проверки

Соответственно, анализ производства для испытателей лучше проводить в виде документального анализа – изучение технологической, конструкторской, эксплуатационной документации, записей о качестве, протоколов калибровки и поверки оборудования. Для удобства предлагается создание опросных листов или разработка испытательным центром определенной документированной процедуры с описанием порядка проведения анализа, максимально учитывающего интересы как изготовителя СИ так и испытателя.

Таким образом, испытания СИ должны включать не только определение характеристик готового образца, но и оценку состояния производства. В ходе проведенного обзора документов, содержащих процедуры анализа производства, выбраны критерии оценки, на которые необходимо обратить внимание в первую очередь, а для оптимизации и упрощения предложены возможные способы проведения.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 50779.51-95 Статистические методы. Непрерывный приемочный контроль качества по альтернативному признаку: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 1996-07-01/ Госстандарт России / Введ. – Москва: Издательство стандартов, 1996. – 16 с.
2. МИ 3676-2023 Государственная система обеспечения единства измерений. Рекомендации по определению интервалов между поверками средств измерений. Основные положения: [Электронный ресурс] / Интернет-ресурс "Центры стандартизации и метрологии ФБУ ЦСМ" URL: <https://csmrst.ru/ru/press-center/announce/rekomendacii-po-opredeleniyu-intervalov-mezhdu-povertkami-sredstv-izmereniy/> (Дата обращения 10.02.2026).
3. ГОСТ Р 54293-2020 Анализ состояния производства при подтверждении соответствия : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 01.01.2021 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Введ. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 19 с.

УДК 681.2.08: 006.91; ГРНТИ 53.31.33

ТРЕБОВАНИЯ К ПОКАЗАТЕЛЯМ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ С УЧЕТОМ ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

А.И. Сойко, А.Э. Тухватуллина, А.В. Тюрина

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Российская Федерация, Казань, goodnews15@yandex.ru

Аннотация. В работе рассмотрены актуальные проблемы обеспечения и оценки метрологической надежности средств измерений (СИ) на различных этапах их жизненного цикла. Особое внимание уделено различиям в методах оценки на этапах проектирования, производства, эксплуатации и утилизации.

Ключевые слова: вероятность безотказной работы, жизненный цикл, метрологическая надежность, метрологический ресурс, межповерочный интервал, оценка характеристик, поверка, средство измерений.

REQUIREMENTS TO INDICATORS OF METROLOGICAL RELIABILITY OF MEASURING INSTRUMENTS TAKING INTO ACCOUNT THEIR LIFE CYCLE

A.I. Soyko, A.E. Tukhvatullina, A.V. Tyurina

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
Russia, Kazan, goodnews15@yandex.ru

The summary. Article examines current issues related to ensuring and assessing the metrological reliability of measuring instruments (MI) at various stages of their lifecycle. Particular attention is paid to differences in assessment methods at the design, production, operation, and disposal stages.

Keywords: probability of failure-free operation, life cycle, metrological reliability, metrological resource, interverification interval, assessment of characteristics, verification, measuring instrument.

В условиях современного производства достоверность и точность измерительной информации имеет важное значение. Средства измерений (СИ) при этом являются технической основой получения такой информации, а их состояние напрямую определяет качество продукции, безопасность процессов и обоснованность принимаемых решений. Например, в системах коммерческого учета (нефть, газ, химикаты) с учетом высоких требований точности к СИ даже незначительный дрейф их метрологических характеристик (МХ) может привести к финансовым потерям или нарушениям технологических регламентов [1]. В экстремальных условиях эксплуатации, таких как высокие температуры и давления, происходит деградация материалов, коррозия сплавов и накопление отложений в измерительных участках. Эти факторы напрямую влияют на резонансные характеристики преобразователей, что, в свою очередь, приводит к неконтролируемому дрейфу метрологических характеристик. В результате заявленные погрешности измерений, составляющие для плотности $\pm 0.1\%$ (от измеренного значения) и для расхода $\pm 0.05\%$ для жидкостей и $\pm 0.35\%$ для газов (в нормальных условиях), могут быть существенно превышены. [2]. На рис. 1 показана диаграмма для поиска и визуализации причин, которые приводят к возможному выходу МХ за установленные пределы (метрологическому отказу).

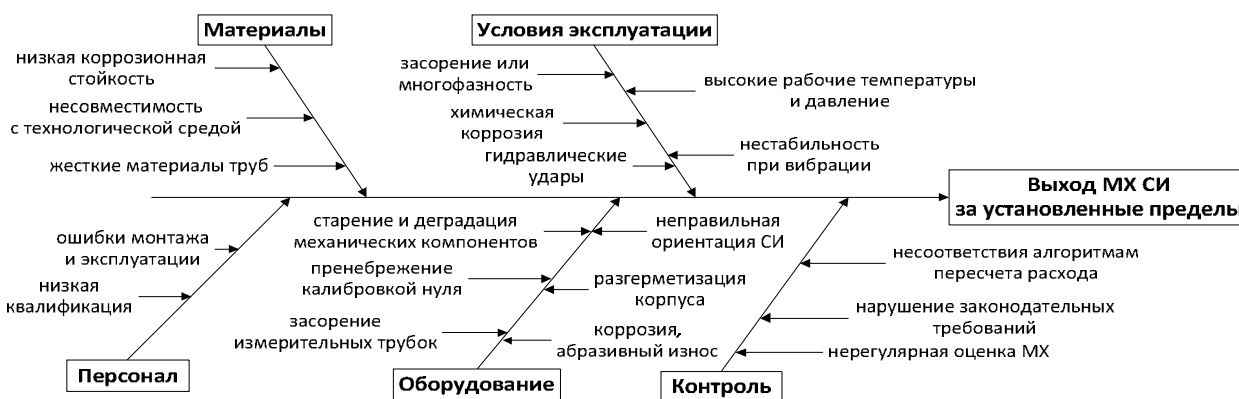


Рис. 1. Диаграмма Исикавы (на примере расходомеров-счетчиков жидкости)

Ключевым свойством, характеризующим способность СИ выполнять свои функции с требуемой точностью в течение времени, является метрологическая надежность.

Под метрологической надежностью (МН) понимают надежность СИ в части сохранения метрологической исправности, т.е. такого состояния, в котором все МХ СИ соответствуют установленным нормам [3, 4]. Она является комплексным показателем, объединяющим такие характеристики, как метрологическая исправность (соответствие метрологических характеристик установленным нормам), безотказность (способность сохранять работоспособность) и ремонтпригодность. Ее количественными мерами выступают вероятность метрологической исправности, метрологический ресурс, срок метрологической службы и другие параметры.

Особенность обеспечения МН заключается в том, что этот процесс носит сквозной характер, охватывая все этапы жизненного цикла (ЖЦ) СИ: от проектирования и изготовления до эксплуатации и утилизации. На каждом из этих этапов возникают свои специфические задачи по оценке и прогнозированию состояния СИ, а также различные источники данных и методы их обработки. Стоит отметить и ряд системных проблем, связанных с оценкой показателей МН на разных стадиях жизненного цикла СИ. Например, разрозненность подходов к такой оценке (прогнозные и расчетные методы применимы на этапе проектирования, статистические методы контроля и испытаний – на этапе производства, эксплуатационные данные и методы прогнозирования – на этапе эксплуатации). Отсутствует единая информа-

ционная среда (данные о состоянии СИ часто хранятся разрозненно у разработчика, производителя, эксплуатанта), недостаточна обоснованность назначения межповерочных интервалов (МПИ), прогнозирования метрологического ресурса и т.д.[6].

Таким образом, формирование единой, системной методологии оценки характеристик МН, адаптированной к каждому этапу ЖЦ, представляет собой актуальную научно-практическую задачу.

Набор таких характеристик, как вероятность безотказной работы, долговременная стабильность, оценка составляющих погрешностей измерения, анализ источников неопределенностей, устойчивость к внешним воздействиям, реализуемых математическими моделями изменения во времени исследуемых МХ [7, 8] позволяет сформировать требования к техническим и метрологическим характеристикам СИ на этапе их проектирования и производства (требования группы А на рис. 2). Требования группы А (А1, А2, А3) являются целевыми и зависят от характеристик прибора (А4, А5, А6) и от условий эксплуатации.

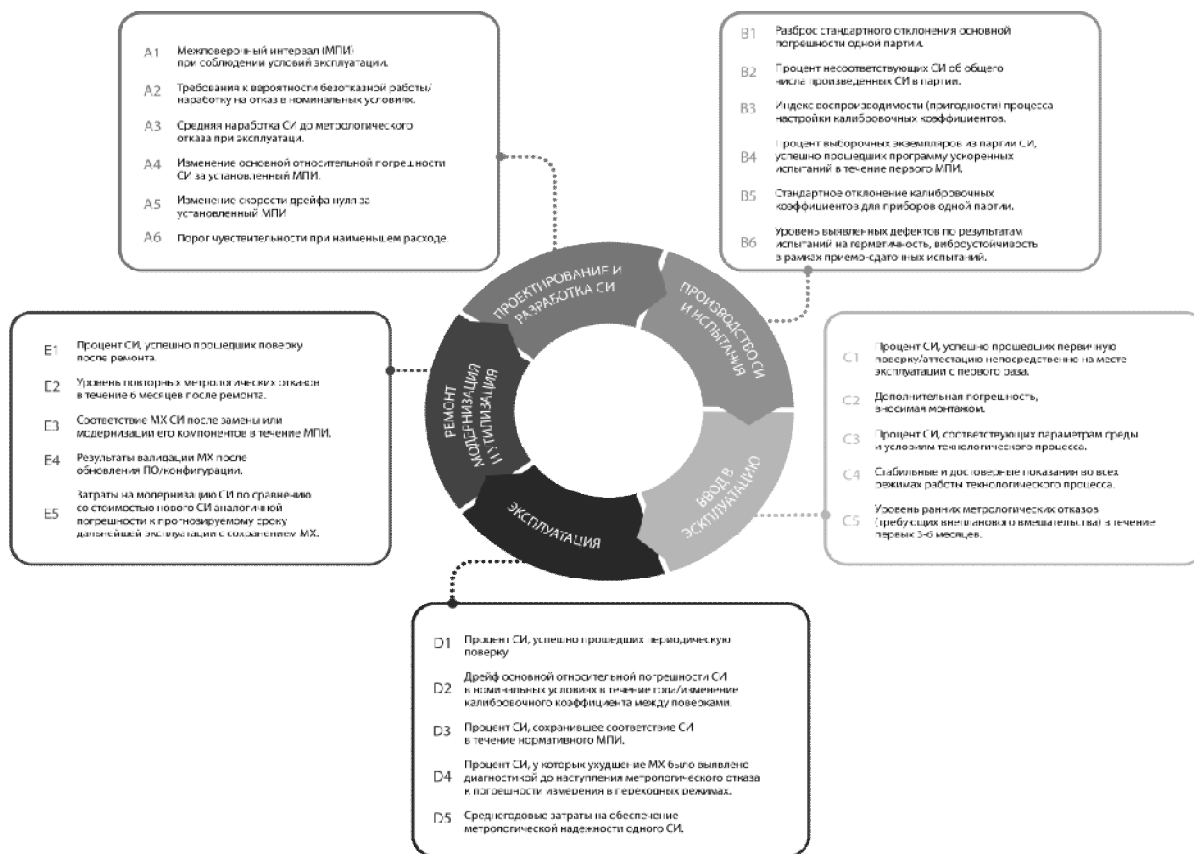


Рис. 2. Требования к показателям МН СИ с учетом их жизненного цикла

На практике внедрение такого подхода сталкивается с рядом трудностей:

- скрытым характером метрологических отказов, при этом постепенный дрейф МХ невозможно обнаружить без проведения периодических проверок или калибровок;
- идеализацией математических моделей, поскольку реальные процессы изменения МХ часто носят немонокотный и случайный характер, тогда как линейные и экспоненциальные модели являются значительным упрощением;
- сложностью сбора репрезентативных данных. Для построения адекватных моделей и точной оценки индексов надежности необходим большой объем высококачественных данных, собранных в течение длительного времени, что актуально в условиях массового производства СИ.

Параметры группы *B* являются определяющими для установления оптимального МПИ и достижения требуемой вероятности безотказной работы (рис. 2). При этом комплексное применение стохастических моделей и статистических методов позволяет:

а) определять критические факторы надежности (параметры производства, эксплуатации, окружающей среды, которые наиболее сильно влияют на безотказность);

б) осуществлять оптимальные стратегии обслуживания (когда и как проводить проверки, профилактические работы, замены, чтобы максимизировать надежность при минимальных затратах);

в) на основе текущего состояния и истории эксплуатации спрогнозировать остаточный ресурс СИ;

г) подтвердить или опровергнуть заявленные производителем значения МПИ, вероятности безотказной работы и т.д., обосновать изменения МПИ;

д) выявлять скрытые дефекты и уязвимости на основе анализа отказов и их причин.

Требования группы *C* (ввод в эксплуатацию) зависят от производства (*B*) и влияют на эксплуатацию (*D*) (рис. 2), например, неправильный монтаж (*C2*) может ухудшить все последующие показатели, а отсутствие поправочных коэффициентов в модели изменения МХ СИ с учетом конструктивных факторов или физических свойств реальной среды, не позволяют эффективно их применять на основе данных, полученных в условиях, при которых осуществляется проверка СИ. Такие модели должны проходить валидацию на реальных данных периодических проверок СИ, которые были переведены с одной на другие технологические среды.

В процессе эксплуатации осуществляется мониторинг ключевых МХ СИ, которые достигаются периодичностью проведения проверок (калибровок) в соответствии с требованиями стандартов, с обязательным ведением записей для подтверждения соответствия. Как правило, подходы к оценке показателей МН основаны на оценке и прогнозировании метрологической надежности на основе:

1) вероятности исправного состояния СИ, при котором МПИ определяется как наибольший промежуток времени, в течение которого вероятность безотказной работы средства измерения остается выше допустимого минимально допустимого уровня. Первый МПИ рассчитывается на основе функции метрологической надежности, а последующие могут корректироваться по условной функции надежности, учитывающей результаты предыдущих проверок;

2) индивидуального прогнозирования МПИ для разнотипных СИ. На основе данных о изменении метрологических характеристик во времени строится прогноз, и момент следующей проверки определяется как время, когда прогнозируемая характеристика достигнет границы поля допуска. С целью оптимизации удельных затрат на метрологическое обслуживание при одновременном поддержании высокого уровня надежности в работе [5] делается акцент на **переход от** усредненных МПИ к индивидуальным;

3) оценке метрологического ресурса СИ, который определяется через минимальный ресурс его аналоговых блоков. Для каждого блока методами статистического моделирования исследуется изменение его метрологических характеристик во времени под влиянием старения компонентов [9].

Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов, основанные на предположении о непрерывном (с конечной случайной скоростью) изменении МХ СИ в процессе эксплуатации или хранения регламентированы в [4]. Однако для СИ с истекшим сроком действия утверждения типа [10] установлено, что интервал между проверками подлежит уменьшению, если более 10% СИ данного типа признаны негодными по результатам проверки в течение года.

С целью оптимизации МПИ, планирования обслуживания СИ и снижения рисков метрологических отказов распространены алгоритмы статистического моделирования:

- регрессионные модели, включающие в себя сбор значения МХ в различные моменты времени и значения факторов, подбор вида зависимости, оценку параметров модели и проверкой ее адекватности (анализ остатков, расчет коэффициентов детерминации, проверка тестов на нормальность и т.д.);

- контрольные карты для мониторинга погрешности СИ во времени [3], на основе которых при наличии выбросов, трендов и пр. можно аргументированно обосновывать сроки и периодичность метрологического обслуживания СИ;

- методы Монте-Карло, по которым определяют распределения для факторов, влияющих на МХ (например, дрейф нуля, изменение чувствительности), генерируют большое число траекторий изменения МХ на основе этих распределений и оценивают доверительные интервалы для момента выхода за установленные значения;

- марковские модели, которые позволяют определять состояния и вероятности переходов между ними, оценивать вероятностей переходов на основе исторических данных и прогнозировать состояния на будущее;

- методы машинного обучения, по которым устанавливают признаки, влияющие на изменение МХ СИ и целевую переменную, разделяют данные на обучающую и тестовую выборки, обучают модель, оценивают ее производительность, прогнозируют и интерпретируют результаты.

Требования группы *E* (ремонт) зависят от качества ремонта и влияют на дальнейшую эксплуатацию (*D*). Акцент в таком случае смещается в сторону поддержания надежности на ее восстановление или же утилизацию без ущерба измерительной системы. В основе прогнозирования на данном этапе лежат математические модели, описывающие изменение погрешности СИ во времени. Это позволяет предсказать момент наступления метрологического отказа и обосновать управленческие решения. Например, если погрешность равномерно возрастает со временем, то экономическая целесообразность ремонта в этом случае оценивается отношением средней стоимости одного ремонта к стоимости нового СИ. Если погрешность изменяется с положительным (учащение отказов) или отрицательным (удлинение интервалов) ускорением, то при положительном ускорении старения частый ремонт может быть невыгоден, и дешевле купить новое СИ.

Для соблюдения требований к МХ СИ, статистическим данным, полученным после ремонта СИ могут быть использованы методы прямых измерений на поверочных установках, анализа ремонтной статистики, статистическое моделирование накопленных данных поверок. Полученный анализ может обосновать выбор между ремонтом, модернизацией и утилизацией СИ:

- а) целесообразность ремонта, если его стоимость существенно ниже стоимости нового СИ, а модель надежности (например, логистическая) прогнозирует достаточный остаточный ресурс;

- б) необходимость модернизации, если она улучшает хотя бы один показатель качества (точность, надежность) без увеличения эксплуатационных затрат, или его улучшение перевешивает сопутствующие дополнительные затраты [10];

- в) потребность в замене/утилизации СИ в случае экономической нецелесообразности частых ремонтов (при положительном ускорении старения) или морального его устаревания, когда последующие отказы не возникают, но СИ перестает отвечать современным требованиям.

На основании указанных требований была сформирована матрица, позволяющая установить наличие связей между ними и определить с учетом всех этапов жизненного цикла показатели, влияющие на вероятность безотказной работы, дрейф характеристики, вероятность метрологической исправности, метрологический ресурс, срок метрологической службы. На основе статистического моделирования целесообразно оценить показатели: вероятность безотказной работы, долговременную стабильность, метрологическую исправность,

метрологический ресурс, метрологический дрейф, погрешность в реальных условиях эксплуатации, процент годных СИ, фактический срок службы.

Библиографический список

1. Чернышова, Т. И. Информационно-аналитическая система оценки метрологической надежности при проектировании электронных измерительных средств / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская, Р. Ю. Курносов // Тамбовский государственный технический университет. – 2017. – С. 94–96.
2. Кострикина, И. А. Применение методов ускоренных испытаний для исследований метрологической надежности информационно-измерительных систем / И. А. Кострикина, А. С. Ишков, Е. Н. Галкина // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 3 (7). – С. 67–73
3. Шафигина, А. Э. Применение контрольных карт при оценке метрологических отказов средств измерений / А. Э. Шафигина, А. И. Сойко // За нами будущее: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов (Санкт-Петербург, 11–14 июня 2024 г.). – Санкт-Петербург, 2024. – С. 470–472.
4. РМГ 74-2004. Государственная система обеспечения единства измерений. Методика определения метрологических характеристик результатов измерений и точностных характеристик средств измерений. – Введ. 2004-07-01. – Москва :Стандартинформ, 2004. – 28 с.
4. РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Термины и определения. – Введ. 2014-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 32 с.
5. Черкасов, Г. Н. Совершенствование логико-вероятностных методов оценки надежности сложных технических систем / Г. Н. Черкасов, И. Г. Овчинников // Надежность и качество сложных систем : сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции (Москва, 15–17 дек. 2021 г.). – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. – С. 145–152.
6. Барановский, В. В. Использование логико-вероятностных методов для оценки безопасности и надёжности ТЭС как структурно-сложных технических систем / В. В. Барановский, Т. Ю. Короткова, М. Ю. Коновалов // Надежность. – 2021. – № 3. – С. 44–52.
7. Чернышова, Т. И. Информационно-аналитическая система оценки метрологической надежности при проектировании электронных измерительных средств / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская, Р. Ю. Курносов // Тамбовский государственный технический университет. – 2017. – С. 94–96.
8. Кострикина, И. А. Применение методов ускоренных испытаний для исследований метрологической надежности информационно-измерительных систем / И. А. Кострикина, А. С. Ишков, Е. Н. Галкина // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 3 (7). – С. 67–73
9. Деев, В. Н. Методический подход к оценке экономической и технико-экономической эффективности метрологического обеспечения техники / В. Н. Деев, М. Р. Гапов // Журнал исследований по управлению. 2020. – №. 4. – С. 44–49.
10. Об утверждении порядка установления и изменения интервала между поверками средств измерений, порядка установления, отмены методик поверки и внесения изменений в них, требований к методикам поверки средств измерений: приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 28 августа 2020 г. № 2907 (Зарегистрирован 23.10.2020 № 60544)

УДК 519.246.8 + 681.5.032; ГРНТИ 90.03.03

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСХОДОМЕРОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

К.С. Естеркова*, А.И. Сойко**

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Российская Федерация, Казань, *karina.yesterekova@mail.ru, **alexsoiko@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматриваются теоретико-методологические аспекты анализа и прогнозирования скорости изменения метрологических характеристик расходомеров в процессе эксплуатации. Предложена схема исследования, включающая три этапа: первичный анализ исходных данных без обработки, восстановление пропущенных значений и формирование временного ряда, отбор значимых факторов и построение прогноза с учетом искусственного дрейфа характеристик. Продемонстрировано, что оценка скорости изменения параметров позволяет выявлять участки ускоренного изменения характеристик, прогнозировать

момент выхода характеристик за пределы допуска и оценивать темп возможного наступления метрологического отказа.

Ключевые слова: скорость изменения, метрологический отказ, метрологические характеристики, дрейф, временной ряд.

METHODOLOGICAL BASES FOR ANALYSING AND FORECASTING THE RATE OF CHANGE IN THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF FLOW METERS DURING OPERATION

K.S. Yesterekova*, A.I. Soyko**

*Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI,
Russia, Kazan, *karina.yesterekova@mail.ru, **alexsoiko@yandex.ru*

The summary. The paper considers theoretical and methodological aspects of analyzing and forecasting the rate of change in the metrological characteristics of flow meters during operation. A research scheme is proposed that includes three stages: initial analysis of raw data without processing, restoration of missing values and formation of a time series, selection of significant factors, and construction of a forecast taking into account artificial drift of characteristics. It has been demonstrated that evaluating the rate of change in parameters allows one to identify areas of accelerated change in characteristics, predict when characteristics will exceed tolerance limits, and estimate the rate of possible metrological failure.

Keywords: rate of change, metrological failure, metrological characteristics, drift, time series.

В условиях роста требований к обеспечению достоверных результатов, метрологическое обеспечение выступает неотъемлемой частью системы управления качеством. Точность измерений приборов влияет на качество продукции, стабильность процессов. Недостоверные результаты измерений создают риск экономических потерь. В условиях эксплуатации влияние оказывает совокупность факторов, включающих температурные колебания, изменение давления, износ чувствительных элементов прибора, загрязнения остаточными веществами, механические нагрузки. Перечисленные факторы обуславливают постепенное изменение метрологических характеристик, что может свидетельствовать выходу параметров за пределы допуска в межповерочный интервал [1]. Плановые мероприятия по поверкам и калибровкам средств измерений не исключают изменений метрологических характеристик в процессе эксплуатации в период межповерочного интервала, что и влечет за собой погрешность в измерениях. Традиционный подход фиксирует состояние прибора в определенный момент времени, однако такой подход не отражает динамику изменений характеристик и их тенденцию [2]. Таким образом, проблема заключается в отсутствии инструментов для своевременного фиксирования изменений метрологических характеристик и предупреждения об отклонениях прибора, а также в отсутствии подходов способных учитывать воздействие внешних факторов и эксплуатационные условия.

Ранее продемонстрировано, что анализ временных рядов позволяет оценить метрологическую надежность приборов и прогнозировать изменение метрологических характеристик в процессе эксплуатации в различных диапазонах расхода [3]. Использование временных рядов предоставляет возможность выявлять скрытые закономерности, неожиданные отклонения и долгосрочные тенденции. Благодаря построению моделей появляется возможность прогнозировать будущие значения временного ряда.

Настоящая работа расширяет данный подход, уделяя особое внимание скорости изменения характеристик как показателя стабильности прибора. Оценка скорости изменения метрологических характеристик позволит спрогнозировать момент выхода параметров за пределы допуска и сформировать решение по корректировке межповерочного интервала. Непосредственно на результат прогнозирования влияют данные ресурсных испытаний, которые зачастую могут быть недостаточно систематизированы, принимая во внимание, что данные могут характеризоваться неполнотой наблюдений, случайными отклонениями и т.д. Формирование методологических основ анализа скорости изменения метрологических характери-

стик расходомеров в процессе эксплуатации представляется актуальным. Цель работы заключается в обосновании методологических принципов анализа скорости изменения метрологических характеристик в качестве показателя эксплуатационной стабильности и прогнозирования их изменения.

Развитие подходов к анализу изменений метрологических характеристик и роль показателя скорости изменения параметров

В работе [4] представлена реализация расчетно-экспериментальных методов выбора прогностической модели для оценки дрейфа метрологических характеристик массовых расходомеров, предложенный алгоритм позволяет оценить вероятность метрологического отказа, то есть вероятность выхода характеристик за пределы допуска. Настоящая работа строится на этих результатах, интегрируя показатель скорости изменения характеристик и принципы его анализа в условиях дискретных и неполных данных. Введение показателя скорости обеспечивает возможность выявления ускоренных участков изменения характеристик и прогнозирование выхода параметров за пределы допуска, что расширяет ранее описанный подход.

Скорость изменения метрологических характеристик является не только показателем оценки текущей динамики изменений, но и также дает возможность смоделировать сценарий ускоренного изменения параметров с целью выявления критических точек эксплуатации прибора. Искусственное увеличение скорости позволяет оценить момент выхода прибора за допустимые границы, а также оценить темп наступления возможного метрологического отказа.

Данный подход позволяет выявить наиболее чувствительные участки диапазона измерений и заблаговременно знать о потенциальной потере точности измерений. Прогнозирование ускоренного дрейфа характеристик представляет основу для планирования технического обслуживания и корректировки межповерочного интервала с учетом вероятности выхода параметров за пределы допуска. В результате, появляется возможность управления рисками метрологического отказа и повышения достоверности измерений в реальных условиях эксплуатации.

Методологические проблемы анализа исходных данных и схема исследований изменений метрологических характеристик

Структура эксплуатационных данных напрямую влияет на анализ скорости изменения метрологических характеристик расходомеров. Данные формируются на основе протоколов поверок, в результате чего ряд может иметь ограничения: дискретность, неполнота данных, шумовые составляющие. Нерегулярность измерений усложняет оценку локальной скорости изменения, интервалы между измерениями могут существенно различаться, что требует нормирования временного ряда. Пропуски в измерениях могут привести к формированию ложных тенденций без предварительной обработки.

Применение методов интерполяции позволяет восстановить пропуски и получать равномерные временных ряды. Однако необходимо учитывать риск сглаживания изменений данных, чрезмерная детализация восстановленных данных может привести к переоценке модели.

Существенной проблемой также является влияние случайных колебаний. Поскольку, например, при малых расходах возникает вероятность того, что оценка скорости будет отражать случайные колебания, а не действительную тенденцию изменений, как это было продемонстрировано в работе [3].

Отсутствие необходимого количества значимых переменных способно привести к неточной оценке изменения, в то время включение чрезмерного количества переменных усложняет анализ и может снижать достоверность прогнозных результатов.

Таким образом, рационально отобранные переменные и обработка данных позволяют корректно анализировать скорость изменения метрологических характеристик. Все вышесказанное формирует основу для построения схемы анализа изменения характеристик и прогнозирования их динамики.

На основе выявленных методологических проблем можно сформировать схему анализа скорости изменения метрологических характеристик расходуемых. Схема представляет собой несколько последовательных этапов, состоящая из трех вариантов моделирования, обеспечивая использование исходных данных и формирование прогнозов изменений параметров. Рассмотрение трех вариантов моделирования на исходных данных с восстановлением пропусков, отбором значимых факторов, прогнозированием обусловлено последовательным усложнением анализа, необходимым для оценки влияния решений на итоговые выводы.

Первая модель основывается на использовании исходных данных без предварительной обработки. Данный этап необходим для анализа структуры временного ряда, включая пропуски, интервалы между измерениями. Здесь оценивается реальная динамика изменений метрологических характеристик в условиях эксплуатации.

Использование исходных данных без обработки обеспечивает выявление общей тенденции изменения параметров, предварительную оценку прогноза. Данная модель позволяет оценить объем информации, который содержится в исходных данных ресурсных испытаний.

Однако использование данных без обработки имеет ряд ограничений. Дискретность наблюдений может привести к разрывам во временной структуре ряда. Неполнота данных способна скрывать интервалы ускоренного изменения параметров или наоборот ложно строить предположения о стабильности прибора. Непосредственно, влияние случайных колебаний усложняет интерпретацию результатов анализа, кратковременные отклонения не отражают направления изменения метрологических характеристик, но способны скрывать медленный систематический дрейф. Таким образом, данный этап является базовым и необходимым для последующего усложнения анализа.

Во второй модели предполагается восстановление пропущенных данных и формирование равномерного временного ряда. Благодаря восстановлению пропущенных данных можно оценить динамику изменений параметров, что является основой для расчета скорости изменений метрологических характеристик.

С помощью внутренней интерполяции и сглаживания можно выявить скрытые тенденции, что тяжело определить по первой модели. Однако на структуру временного ряда методы восстановления данных могут влиять различно, что в последующем может сказаться на скорости изменения параметров. Именно сравнение первой модели со второй способствует определению момента, при котором интерполяция и сглаживание существенно изменяют динамику параметров.

Как следствие, во второй модели оценивается соответствие результатов реальной динамике характеристик или способу восстановления данных.

В третьей модели выбираются несколько значимых факторов. Отбор значимых факторов осуществляется на основе удаления мультиколлинеарных признаков. Обеспечивается повышение устойчивости получаемых прогностических результатов и снижение влияния случайных корреляций. На данном этапе моделируется ускорение изменения характеристик с целью оценки риска выхода параметров за пределы допуска. Строятся разнообразные модели прогнозирования, включая нейросетевые модели, классификационные методы, статистические подходы.

Таким образом, третья модель позволяет количественно оценивать темп наступления возможного метрологического отказа в заданном временном интервале и формировать ре-

шения о стабильности прибора и назначении межповерочного интервала. Третья модель представляет собой завершённый аналитический этап, в котором скорость изменения метрологических характеристик рассматривается как ключевой инструмент оценки риска выхода параметров за пределы допуска в условиях эксплуатации прибора.

Планируется апробация предложенного подхода на исходных данных массового расходомера, как это представлено в работе [4]. В данной работе демонстрируется практическая применимость метода и оценка точности модели в условиях реальной эксплуатации расходомера.

Заключение

В результате данной работы была обоснована актуальность анализа скорости изменения метрологических характеристик расходомеров в процессе эксплуатации. Представлена схема поэтапного анализа исходных данных на основе описания особенностей и проблем анализа результатов ресурсных испытаний. Предложенный подход является основой для дальнейшей практической реализации и апробации. Практической значимостью работы является оптимизация межповерочного интервала и заблаговременная оценка стабильности работы прибора.

Библиографический список

1. Сулаберидзе В.Ш., Неклюдова А.А. Метрологическая надёжность средств измерений и оценка риска метрологического отказа // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2023. Т. 29. № 4. С. 574-585.
2. РМГ 74-2004 "Государственная система обеспечения единства измерений. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений" - Введ. 2005-03- М.: Стандартинформ, 2006. - 24 с.
3. Естерекова К. С. Прогнозная модель изменения погрешности расхода на основе временных рядов // «XXVII Туполевские чтения (школа молодых ученых)». 2025. С. 1331-1335.
4. Сойко А. И., Шафигина А. Э., Естерекова К. С. Оценка метрологической надёжности расходомеров на основе анализа временных рядов // Приборы. 2025. № 11 (305). С. 42-50.

УДК 658.5:006.91; ГРНТИ 82.05.21

НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВНЕДРЕНИЯ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА В ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ

А.В. Губарев

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, gubarev.a.v@rsreu.ru*

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы нормативно-методического обеспечения как ключевого фактора успешного и устойчивого внедрения принципов бережливого производства в деятельность метрологической службы промышленного предприятия. Обосновывается необходимость интеграции инструментов бережливого производства в существующую систему менеджмента качества для придания им обязательного и системного характера. Особое внимание уделяется разработке стандарта организации, адаптирующего инструменты (5S, SMED, визуализация, кайдзен) под специфику работы со средствами измерений. Рассматриваются вопросы актуализации положения о метрологической службе для закрепления новой философии непрерывных улучшений, а также детализации изменений в должностных инструкциях сотрудников. Подчеркивается роль карт стандартизированной работы как практического инструмента визуализации и совершенствования процессов поверки.

Ключевые слова: бережливое производство, метрологическая служба, нормативно-методическое обеспечение, стандарт организации, система 5S, визуальное управление, стандартизированная работа, SMED, кайдзен, система менеджмента качества, средства измерений, непрерывное улучшение, карта процесса, должностная инструкция.

REGULATORY AND METHODOLOGICAL SUPPORT FOR THE IMPLEMENTATION OF LEAN PRODUCTION IN THE METROLOGICAL SERVICE

A.V. Gubarev

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, gubarev.a.v@rsreu.ru*

The summary. The article discusses the issues of regulatory and methodological support as a key factor in the successful and sustainable implementation of lean production principles in the activities of an industrial enterprise's metrological service. It substantiates the need to integrate lean production tools into the existing quality management system to make them mandatory and systematic. Special attention is given to the development of an organization standard that adapts the tools (5S, SMED, visualization, and kaizen) to the specific requirements of working with measuring instruments. The article discusses the need to update the Metrology Service Regulations to reflect the new philosophy of continuous improvement, as well as to detail changes in employees' job descriptions. It also highlights the role of standardized work cards as a practical tool for visualizing and improving calibration processes.

Keywords: Lean production, metrological service, regulatory and methodological support, organization standard, 5S system, visual management, standardized work, SMED, kaizen, quality management system, measurement tools, continuous improvement, process map, and job description.

Успешное и устойчивое внедрение принципов бережливого производства в деятельность метрологической службы промышленного предприятия невозможно без соответствующего нормативного закрепления. Все разрабатываемые в этом направлении мероприятия требуют интеграции в существующую системы менеджмента качества и метрологического обеспечения предприятия. Это позволит не только формализовать новые подходы, но и создать правовую основу для их постоянного применения, сделать их обязательной частью корпоративной культуры, а не временной инициативой. Процесс трансформации должен быть подкреплен комплексом внутренних нормативных документов, которые детализируют процедуры, закрепляют зоны ответственности и устанавливают критерии оценки эффективности [2, 5].

Основополагающим документом, который данной трансформации, должен стать стандарт организации «Метрологическое обеспечение. Применение принципов бережливого производства». Разработка этого стандарта является первоочередной задачей. Название разрабатываемого документа может отличаться от предложенного, но его смысл должен быть сохранен.

Его цель – создать единый понятийный аппарат и систематизировать подход к использованию инструментов бережливого производства именно в контексте метрологической деятельности. В отличие от общих положений о бережливом производстве, данный стандарт будет сфокусирован на специфике работы со средствами измерений, эталонами и поверочными процессами. В нем необходимо детально описать такие инструменты, как система 5S, визуальное управление, канбан, SMED и кайдзен, но не в классическом теоретическом ключе, а через призму их практического применения в метрологических лабораториях, испытательных подразделениях и на контрольно-измерительных постах [3].

Например, раздел, посвященный 5S, должен содержать не просто перечень принципов, а конкретные требования к организации хранения средств измерений, маркировке эталонов и поддержанию чистоты на рабочих местах, например, поверителей. Особое внимание в стандарте следует уделить регламентации визуального управления. Требуется прописать обязательное использование цветовой маркировки для индикации статусов средств измерений: зеленый цвет для приборов с действующей поверкой, желтый для тех, у которых срок поверки истекает в ближайшем будущем (конкретный временной интервал можно установить в стандарте организации), и красный для приборов, запрещенных к применению. Это

простое правило, закрепленное на уровне стандарта, позволит мгновенно оценивать ситуацию и предотвращать использование неисправного или неуправляемого оборудования [4. 6].

Для того чтобы процессы стандартизации не противоречили требованиям законодательства об обеспечении единства измерений, в стандарт организации необходимо включить отдельный раздел, посвященный управлению изменениями. В нем следует прописать порядок действий, когда инициатива по улучшению (кайдзен-предложение) затрагивает методику поверки или требования к эталонному оборудованию. Важно установить четкий регламент согласования таких изменений с уполномоченными лицами (главным метрологом, техническим руководителем) и порядок их валидации, чтобы подтвердить, что нововведение не снижает точность и достоверность измерений.

Важным разделом стандарта станет описание процедур внутреннего аудита и оценки эффективности.

Недостаточно просто внедрить инструменты, необходимо регулярно проверять, насколько они работают и дают ли ожидаемый результат. Стандарт должен установить периодичность таких аудитов, утвердить разработанные чек-листы для оценки состояния рабочих мест по критериям 5S, определить ключевые показатели эффективности, такие как время цикла поверки, коэффициент использования оборудования, процент сокращения потерь и т.д.

Следующим по значимости важным шагом является актуализация «Положения о метрологической службе». Этот документ определяет миссию, цели и организационную структуру службы.

В его текущую редакцию необходимо внести изменения, отражающие новую философию работы. Цели метрологической службы должны быть пересмотрены и дополнены не только традиционными формулировками, касающимися обеспечения единства измерений, но и ориентирами на непрерывное улучшение. В положении следует прямо указать, что одной из основных задач метрологической службы является систематическое выявление и устранение потерь во всех процессах метрологического обеспечения.

Это придаст работе в данном направлении официальный статус и будет мотивировать руководителей подразделений уделять ему должное внимание. Кроме того, в положение необходимо вменить обязанность сотрудников участвовать в деятельности кружков качества и подаче рационализаторских предложений.

В новой редакции Положения следует также пересмотреть систему мотивации и ответственности. Необходимо закрепить критерии, по которым оценивается деятельность не только начальника службы, но и рядовых сотрудников в контексте бережливого производства. Например, ввести показатели, учитывающие количество и качество поданных сотрудником предложений по улучшению, либо отсутствие замечаний по организации рабочего пространства по системе 5S. Это создаст материальную заинтересованность персонала в поддержании новых стандартов.

Следует закрепить на нормативном уровне работу системы «Андон», которая позволяет любому сотруднику остановить процесс при обнаружении отклонения. Например, метролог, обнаруживший несоответствие эталона или неясность в методике поверки, должен иметь не только право, но и обязанность инициировать сигнал и приостановить работу до выяснения причин и устранения проблемы.

Это кардинально меняет культуру работы, перекладывая ответственность за качество с контролирующих органов (метрологического надзора) на непосредственных исполнителей, что является одной из ключевых идей бережливого производства.

Для того чтобы новые принципы дошли до каждого исполнителя, требуется точечная работа с операционной документацией. Это предполагает внесение изменений в должностные инструкции метрологов, поверителей и контролеров. В эти инструкции должны быть интегрированы конкретные стандартизированные процедуры, разработанные в результате

внедрения инструментов бережливого производства. К примеру, в инструкцию для поверителя необходимо включить ежедневные обязанности по поддержанию порядка на рабочем месте в соответствии с правилами 5S, прописать алгоритм действий по визуальной проверке статуса средств измерений перед началом работы. Если прибор имеет красную маркировку, сотрудник обязан не просто не использовать его, а по определенному регламенту изъять его из рабочей зоны, уведомить непосредственного руководителя и внести запись в специальный журнал несоответствий. Аналогичным образом, в инструкции необходимо детализировать процедуры, оптимизированные с помощью метода SMED. Описание переналадки поверочной установки должно быть разделено на четкие шаги с указанием, какие операции относятся к внешним и выполняются заранее, а какие – к внутренним и производятся при остановке оборудования. Такая степень детализации делает работу предсказуемой, воспроизводимой, обеспечивает легкую обучаемость сотрудников, что снижает зависимость от личного опыта конкретного специалиста [1].

Одним из наиболее эффективных инструментов стандартизации является создание «Карт стандартизированной работы» для типовых процессов поверки.

Этот документ является логическим развитием рабочих инструкций, но имеет более наглядный и практический характер. Карта стандартизированной работы – это не просто текстовое описание, а схематическое представление всего процесса поверки конкретного типа прибора, например, цифрового мультиметра. На карте в хронологической последовательности отображаются все операции, начиная от момента получения заявки и заканчивая возвратом прибора в цех. Для каждой операции указывается нормативное время выполнения, последовательность действий, используемые инструменты и средства измерений, а также ключевые точки контроля, где возможно возникновение ошибок. Главное преимущество карты заключается в ее наглядности. Она вывешивается непосредственно на рабочем месте, служа постоянным напоминанием и руководством к действию.

Любое отклонение от стандарта становится сразу заметным. Карта также является основой для последующего совершенствования. Когда возникает идея, как оптимизировать процесс, ее сначала проверяют на соответствие карте, а после успешной апробации – вносят изменения в саму карту, тем самым фиксируя новый, улучшенный стандарт работы. Разработка таких карт для наиболее массовых и критичных процессов поверки позволит резко повысить стабильность и предсказуемость работы метрологической службы.

Актуализация нормативной базы представляет собой системную работу по пересмотру ключевых документов, регулирующих деятельность метрологической службы. От общего стандарта, задающего стратегические ориентиры, через положение, определяющее организационные основы, к рабочим инструкциям и картам стандартизированной работы, регламентирующим действия каждого сотрудника, – все эти уровни должны быть взаимосвязаны и работать на достижение единой цели.

Такой комплексный подход обеспечит не разовое улучшение, а создание механизма постоянного, непрерывного совершенствования процессов метрологического обеспечения на промышленном предприятии, что является сутью философии бережливого производства.

Библиографический список

1. Абрамов А.М. Анализ эффективности метода метрологического испытания при вычислении интегральной нелинейности АЦП / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 90. С. 133-143.
2. Бочаров В.А., Волосатова Т.М., Филиппов М.В., Чичаева Л.В., Продан С.А. Декомпозиция и агрегация функциональных моделей систем / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 89. С. 85-93.
3. Кабанов А.А., Федоров И.А. Архитектура системы управления цифровыми двойниками производств как основа интеграции различных моделей их представлений / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 162-176.
4. Губарев А.В., Губарева С.В. Требования к СМК метрологической службы промышленного предприятия, выполняющей работу по обеспечению единства измерений / Пути совершенствования технологических про-

цессов и оборудования промышленного производства. сборник тезисов докладов IX международной научно-технической конференции. Алчевск, 2025. С. 212-214.

5. Волкова С.В., Губарев А.В. Бережливое производство в административных подразделениях предприятия / Современные материалы, техника и технология. сборник научных статей 8-й Международной научно-практической конференции. 2018. С. 92-96.

6. Бутусов С.С., Губарев А.В. Внедрение системы бережливого производства на примере АО "ГРПЗ" / Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2025. Сборник трудов VIII Международного научно-технического форума. В 10-ти томах. Рязань, 2025. С. 292-298.

УДК 005.92; ГРНТИ 82.13.13

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ T-FLEX DOCS ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ СОГЛАСОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

А.В. Губарев

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, gubarev.a.v@rsreu.ru*

Аннотация. В статье рассматривается вопрос автоматизации ключевых бизнес-процессов документооборота на промышленных предприятиях с помощью программного комплекса T-FLEX DOCS. Акцент сделан на процедурах согласования технической документации, включая конструкторскую, технологическую документацию и извещения об изменении. Подробно описан механизм создания и настройки бизнес-процедур как последовательности состояний и переходов. Анализируются различные способы назначения исполнителей работ, возможности коллективного согласования, а также инструменты мониторинга выполнения процессов и обработки исключительных ситуаций. Отдельное внимание уделяется визуальному представлению процесса, контролю сроков и формированию заданий для пользователей. Применение описанного подхода позволяет повысить прозрачность, управляемость и скорость прохождения технической документации на предприятии.

Ключевые слова: T-FLEX DOCS, автоматизация документооборота, бизнес-процесс, техническая документация, согласование документов, конструкторская документация, технологическая документация, извещение об изменении, управление заданиями, электронный документооборот, роли пользователей, контроль исполнения.

USING THE T-FLEX DOCS SYSTEM TO AUTOMATE TECHNICAL DOCUMENT COORDINATION BUSINESS PROCESSES

A.V. Gubarev

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, gubarev.a.v@rsreu.ru*

The summary. The article discusses the automation of key business processes of document management at industrial enterprises using the T-FLEX DOCS software package. The focus is on the procedures for approving technical documentation, including design and technological documentation, as well as change notices. The article provides a detailed description of the mechanism for creating and configuring business procedures as a sequence of states and transitions. It analyzes various methods for assigning work to individuals, the possibilities for collective approval, and the tools for monitoring process execution and handling exceptional situations. Special attention is given to the visual representation of the process, the control of deadlines, and the creation of tasks for users. The application of the described approach allows to increase transparency, manageability and speed of passing of technical documentation at the enterprise.

Keywords: T-FLEX DOCS, document automation, business process, technical documentation, the agreed-upon.

В условиях современного промышленного производства эффективность работы предприятия во многом определяется скоростью и прозрачностью внутренних коммуникаций. Особое значение это приобретает при работе с технической документацией, где процессы согласования, утверждения и внесения изменений являются критически важными, но зачас-

тую остаются наиболее трудоемкими и длительными этапами. Традиционные методы, основанные на бумажном документообороте или неструктурированной электронной переписке, приводят к затягиванию сроков, потере данных и возникновению ошибок [1, 4].

На большинстве промышленных предприятий можно выделить несколько процессов, связанных с документооборотом технической документации:

- согласование конструкторской документации (КД);
- согласование технологической документации (ТД);
- согласование извещений об изменении (ИИ).

Программный комплекс T-FLEX DOCs позволяет построить данные алгоритмы процессов документооборота технической документации в виде бизнес-процессов. Бизнес-процесс в T-FLEX DOCs выполняется по заранее созданной и настроенной бизнес-процедуре. Бизнес-процедура T-FLEX DOCs представляет собой алгоритм, отражающий последовательность действий работников при выполнении типовой повторяющейся процедуры в организации. Данный алгоритм представляется в виде блок-схемы, отдельные структурные элементы которой называются состояниями. Состояния бывают различных типов, например, таких как «Работа», «Согласование», «Рассылка уведомления», каждый из которых имеет свои параметры [2, 6].

Для состояния задаются возможные варианты завершения – переходы. Каждый переход приводит к строго определенному заранее результату.

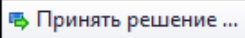
На этапе создания процедуры в T-FLEX DOCs назначаются исполнители работ, задаются сроки их выполнения, формируются пользовательские диалоги для ввода изменяющихся данных.

Для хранения схем и параметров бизнес-процедур предназначен справочник «Процедуры».

Запуск процесса может выполнить любой пользователь системы, имеющий соответствующий доступ, но прервать процесс может только администратор процесса.

При работе бизнес-процесса некоторые операции могут выполняться в автоматическом режиме, например, изменение значений указанных параметров или стадии подключенного к бизнес-процессу объекта.

В состояниях процесса, которые требуют участия пользователя, будут сформированы и разосланы исполнителям работ соответствующие задания. Задания, рассылаемые в рамках работы бизнес-процесса, аналогичны заданиям внутренней почтовой службы T-FLEX DOCs. Отличием будут варианты действий, предложенные в задании: в почтовом задании они стандартны («Принять», «Отклонить», «Завершить» и так далее), а в задании по бизнес-процессу эти варианты (решения) могут быть различными и соответствуют переходам на схеме процедуры [3].

При определенных настройках процедуры исполнитель работы может иметь возможность принять несколько решений. В этом случае в окне задания будет доступна кнопка , при нажатии на которую откроется окно со списком возможных решений.

Исполнитель работы, входящей в бизнес-процедуру, может быть задан одним из следующих способов:

- прямо – исполнитель указывается в окне свойств работы;
- косвенно – исполнителем данной работы станет пользователь, являющийся исполнителем другой указанной работы. Таким образом, один пользователь может быть автоматически назначен исполнителем нескольких связанных работ;
- переменной – ввод значения переменной при запуске бизнес-процесса или в каком-либо из состояний его выполнения осуществляется с помощью пользовательского диалога, подключенного к процедуре;

- формулой (макросом) – исполнитель работы определяется в результате выполнения кода макроса;
- параметром объекта – исполнитель работы определяется значением указанного параметра. Например, может использоваться параметр объекта «Автор последнего изменения»;
- ролью – в окне свойств работы указывается роль, которой должен соответствовать исполнитель работы, например, «Утверждающий». При запуске процесса требуемый комплект ролей подключается автоматически согласно заданным условиям или указывается вручную автором процесса. Это позволяет использовать одну и ту же бизнес-процедуру для запуска однотипных процессов, отличающихся только набором исполнителей.

Помимо этого, в качестве исполнителя работы может быть указан не только конкретный пользователь, но и группа пользователей из справочника «Группы и пользователи», или сформирован список возможных исполнителей. В таком случае исполнитель работы будет выбран из данной группы или списка при запуске процесса или во время его выполнения. Способ выбора исполнителя работы задается при настройке бизнес-процедуры. Доступны следующие варианты:

- первый принявший задание – всем пользователям из группы пользователей или списка возможных исполнителей будут опрашены одинаковые задания. Пользователь, первым принявший полученное задание, будет являться исполнителем работы. Задания, отправленные остальным пользователям, автоматически аннулируются;
- при запуске процесса – исполнителя работы необходимо выбрать в окне запуска процесса;
- на предыдущем этапе – исполнитель предыдущей работы процедуры назначает исполнителя данной работы. Если предыдущим состоянием является состояние другого типа, то в настройках процедуры указывается решение, при принятии которого станет доступно назначение исполнителя данной работы.

В бизнес-процессе может присутствовать состояние согласования, которое позволяет пользователям коллективно принять решение. В этом случае при настройке процедуры указывается условие перехода процесса в следующее состояние:

- решение принято хотя бы одним исполнителем из списка;
- решение принято всеми исполнителями;
- решение принято простым большинством исполнителей.


Помимо рассылки заданий исполнителям работ, в схему процедуры может входить и рассылка указанным пользователям уведомлений – обычных почтовых сообщений с заданным текстом.

К процедуре могут быть подключены нормативные документы – объекты любых справочников, которые не участвуют в логике бизнес-процесса, а лишь отображаются в почтовом задании. В качестве нормативных документов могут использоваться ГОСТ, требования, примеры и тому подобное.

T-FLEX DOCs позволяет задавать нормативную длительность бизнес-процесса – срок, за который данный процесс должен быть выполнен. Для состояний «Работа» и «Согласование» может указываться как их плановая длительность, так и плановая длительность в процессе. Плановая длительность – это срок от начала выполнения состояния до его планируемого завершения, плановая длительность в процессе – срок от начала выполнения процесса до планируемого завершения текущего состояния.

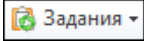
На случай возникновения ошибок при работе бизнес-процесса (не задан исполнитель работы, превышен срок выполнения) в свойствах процедуры нужно добавить состояние «Исключение» и настроить варианты обработки таких ситуаций. К примеру, назначается ответственный исполнитель, которому будет отправлено уведомление об ошибке и который упол-

номочен принимать решение в данной ситуации, например, прервать процесс или завершить работу вместо исполнителя состояния [5].

Для запуска бизнес-процесса по созданной процедуре обычно назначается отдельная команда контекстного меню объекта или кнопка панели инструментов окна справочника. В противном случае бизнес-процесс запускается нажатием на кнопку  в справочнике «Процедуры». Также бизнес-процесс может быть запущен автоматически в зависимости от настройки системы.

Пользователь может посмотреть, в каком из состояний находится запущенный бизнес-процесс в данный момент. Отобразится схема процесса, блоки которой имеют различное цветовое обозначение:

- синий цвет – пройденные состояния;
- зеленый цвет – текущее состояние;
- желтый цвет – состояния, которые еще не наступили;
- красный цвет – состояние, в котором произошла ошибка.

На вкладке «Действия процессов» в левой части окна находится список действий процесса, которые уже завершены или выполняются в данный момент. Для каждого действия указывается время начала и завершения. Кнопка  открывает список заданий для выбранного состояния.

Вкладка «Задания» позволяет просмотреть задания, сформированные в ходе выполнения бизнес-процесса.

На вкладке «Сообщения» отображаются сообщения об ошибках, возникающих во время выполнения данного бизнес-процесса.

Автоматизация процессов согласования технической документации на базе системы T-FLEX DOCs является действенным механизмом повышения эффективности работы промышленного предприятия. Использование инструментария бизнес-процедур позволяет формализовать и унифицировать такие ключевые процессы, как согласование конструкторской и технологической документации, а также обработку извещений об изменении. Гибкие настройки системы, включающие различные способы назначения исполнителей (через роли, переменные, группы пользователей), механизмы коллективного принятия решений и визуальный контроль хода выполнения, обеспечивают прозрачность документооборота на всех этапах. Внедрение описанных алгоритмов не только сокращает время прохождения документов и снижает риск ошибок, но и создает единую информационную среду, где каждый участник процесса четко понимает свои задачи и сроки их выполнения, что в конечном итоге способствует повышению качества выпускаемой продукции и общей управляемости предприятия.

Библиографический список

1. Гуляева К.А., Артемьева И.Л. Инструментарий для проектирования систем понятий и баз знаний предметных областей с объектами сложной структуры // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 87. С. 62-77.
2. Бочаров В.А., Волосатова Т.М., Филиппов М.В., Чичаева Л.В., Продан С.А. Декомпозиция и агрегация функциональных моделей систем / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 89. С. 85-93.
3. Кабанов А.А., Федоров И.А. Архитектура системы управления цифровыми двойниками производств как основа интеграции различных моделей их представлений / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 162-176.
4. Рубцова Д.А., Губарев А.В. Преимущества и проблемы внедрения системы электронного документооборота технической документации / Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2025. Сборник трудов VIII Международного научно-технического форума. В 10-ти томах. Рязань, 2025. С. 298-302.
5. Рубцова Д.А., Губарев А.В. Принципы и условия применения электронного документооборота технологической документации / Современные материалы, техника и технология. сборник научных статей 8-й Международной научно-практической конференции. 2018. С. 92-96.

6. Назарцева А.А., Губарев А.В. Совершенствование процесса нормоконтроля технической документации посредством внедрения электронного документооборота / Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. сборник научных трудов 14-ой Международной научно-практической конференции. Юго-Западный государственный университет. 2019. С. 149-152.

УДК 65.018; ГРНТИ 81.81.05

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

А.В. Губарев

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, gubarev.a.v@rsreu.ru*

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема оценки результативности системы менеджмента качества в условиях отсутствия унифицированной методологии. Выполнен анализ существующих подходов к оценке, применяемых в организациях в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 9001. Систематизированы основные методы обработки информации и подходы к формированию интегральных показателей. Подробно раскрыты три ключевых метода оценки результативности: по реализации установленных требований, на основании конкретных показателей и по степени достижения целей. Для каждого метода определены области применения, преимущества и ограничения, а также степень их эффективности на различных этапах развития системы менеджмента качества. Особое внимание уделено методу анализа иерархий как инструменту структурирования задачи оценки. В заключении обоснована необходимость комплексного подхода, сочетающего количественные и качественные критерии, для обеспечения достоверной оценки и повышения эффективности управления качеством на предприятии.

Ключевые слова: система менеджмента качества, результативность, оценка эффективности, методы оценки, показатели качества, процессный подход, метод анализа иерархий, мониторинг процессов, управление качеством.

USING THE T-FLEX DOCS SYSTEM TO AUTOMATE TECHNICAL DOCUMENT COORDINATION BUSINESS PROCESSES

A.V. Gubarev

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, gubarev.a.v@rsreu.ru*

The summary. The article discusses the actual problem of evaluating the effectiveness of a quality management system in the absence of a unified methodology. The analysis of the existing approaches to assessment used in organizations in accordance with the requirements of GOST R ISO 9001 is carried out. The main methods of information processing and approaches to the formation of integral indicators are systematized. Three key methods of performance assessment are described in detail: according to the implementation of established requirements, based on specific indicators and according to the degree of achievement of goals. The fields of application, advantages and limitations, as well as the degree of their effectiveness at various stages of the development of the quality management system are defined for each method. Special attention is paid to the hierarchy analysis method as a tool for structuring the assessment task. In conclusion, the need for an integrated approach combining quantitative and qualitative criteria is substantiated in order to ensure a reliable assessment and increase the effectiveness of quality management at the enterprise.

Keywords: quality management system, effectiveness, efficiency assessment, evaluation methods, quality indicators, process approach, hierarchy analysis method, process monitoring, quality management.

В современных экономических условиях эффективность деятельности организации напрямую зависит от качества управления бизнес-процессами. Одним из ключевых инструментов повышения конкурентоспособности выступает система менеджмента качества (СМК), соответствующая требованиям ГОСТ Р ИСО 9001. Однако наличие сертифицирован-

ной системы не гарантирует ее практической отдачи. Перед руководством любой организации остро встает вопрос не столько о формальном соответствии стандартам, сколько о реальной результативности внедренной системы – ее способности приносить измеримые результаты и достигать поставленных целей [1, 5].

Проблема оценки результативности СМК является одной из центральных в теории и практике управления качеством. Сложность заключается в отсутствии единой, универсальной методологии оценивания. Несмотря на унификацию требований к структуре СМК, стандарты ИСО серии 9000 оставляют за организацией право выбора способов, методов и критериев оценки. Это приводит к многообразию существующих подходов:

Оценка результативности системы менеджмента качества осуществляется в ходе анализа в сфере управления качеством на основе установленного обобщенного показателя результативности СМК изготовителя, характеризующего состояние СМК или ее отдельных процессов.

Существует большое количество методов оценки результативности СМК. Методики имеют разные показатели результативности, которые не позволяют перейти к единой методологии оценки результативности СМК организаций в целом [2, 4].

Несмотря на наличие единых требований к системам управления, в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001 руководство каждой организацией самостоятельно решает, какие способы использовать для оценки и повышения результативности собственной системы менеджмента качества.

Оценку уровня выполнения показателей результативности процессов СМК осуществляет изготовитель по количественным и/или качественным признакам на основе листов оценки результативности СМК.

При проведении оценки результативности используются следующие методы обработки информации:

- метод прямого счета (отношение планового и фактического значений показателя, выраженного в процентах);
- качественный метод (фиксирование одного из состояний: выполнено или не выполнено);
- балльный метод (вычитание из максимального значения штрафных баллов либо назначение определенного количества баллов за выполненную работу).

Общий подход к формированию методики количественной оценки результативности СМК и ее функционирования может быть представлен следующим образом:

- оценка результативности СМК выражается некоторым коэффициентом (от 1 до 100; от 0 до 1);
- значение коэффициента получается суммированием оценок критериев, которые могут быть ранжированы и иметь некоторый весовой коэффициент;
- критерии определяются организацией в зависимости от способности охарактеризовать СМК;
- оценка может быть представлена в виде некоторой абсолютной величины или как отношение к идеальным значениям коэффициентов (критериев) или базовому значению (за какой-то период).

Укрупненная схема решения задачи оценки результативности СМК с использованием метода анализа иерархий (МАИ) представлена на рисунке 1.

В работе рассмотрены три метода оценки результативности по способу установки показателей, по которым осуществляется оценка:

- а) по реализации установленных требований;
- б) на основании конкретных показателей;
- в) по степени достижения целей («по целям»).

При оценке результативности по реализации установленных требований система считается результативной, когда все требования стандарта реализованы, то есть документально подтверждены, и система работает стабильно. Такая оценка применима на этапе создания системы, когда необходимо внедрить СМК. При этом для развитой системы этот метод является неэффективным, так как все требования уже реализованы. В этом методе показатели результативности заменяются показателями, используемыми при мониторинге СМК. Метод не отражает самой деятельности по процессам, но позволяет найти наиболее проблемные места в организации для развития системы [3, 6].

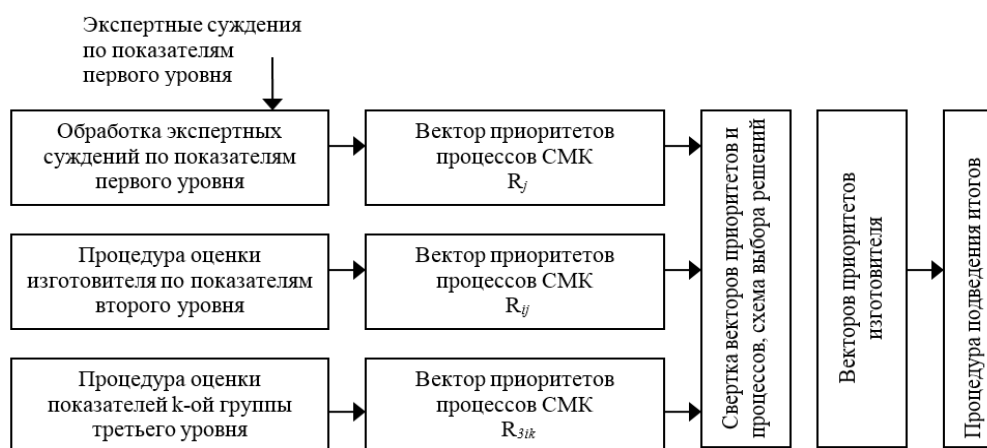


Рис. 1. Схема решения задачи оценки результативности СМК

Оценка результативности на основании конкретных показателей является удобной для оценки деятельности организации в целом. Этот метод устанавливает конкретные показатели результатов основных процессов в организации. Данный метод предполагает расчет интегрального показателя результативности, механизм которого устанавливается самой организацией.

Если все показатели результативности первого уровня результативны, то интегральный показатель результативности находится на достаточно высоком уровне. Если этот показатель принимает значения от 85 % до 95 %, то СМК признается достаточно результативной, то есть система работает вполне стабильно, но не все требования стандартов реализованы полностью. Если выполняется менее 84,9 % требований стандарта, то СМК признается нерезультативной и необходимо провести дополнительный анализ причин невыполнения требований стандартов.

Данный метод достаточно универсальный и применим для различных организаций. Расчеты при использовании данного метода являются трудоемкими, но дают довольно полную информацию о существующей системе.

Для оценки результативности СМК бывает достаточно второго метода, но он не всегда учитывает быстрое изменение внешней среды организации.

Оценка результативности по степени достижения цели позволяет более подробно развивать «проблемные» участки системы. Сущность данного подхода состоит в определении процессов СМК и соответствующих показателей, оценивании выделенных показателей с определенной периодичностью и получении комплексного показателя результативности.

Данный метод применяется в организациях с внедренной и развитой СМК. Деятельность основных процессов отражается в ежегодных целях организации. При данном методе высшее руководство внимательно изучает все процессы организации и устанавливает только те цели, которые приведут к улучшению деятельности организации. Все остальные показатели оцениваются владельцами процессов в рамках мониторинга и периодического анализа текущей деятельности. Оценка результативности в таком случае оценивается как степень достижения целей за исследуемый год. При этом цели могут реализовываться различными под-

разделениями, а общую оценку их достижений сводит служба качества и осуществляет руководитель организации или ответственный представитель руководства по СМК. Плюсом такого метода является акцентирование внимания, как на всех процессах, так и на проблемных, а также быстрая адаптация к изменяющимся внешним условиям. Ответственность за поддержание и текущий мониторинг деятельности при данном методе ложится на владельцев процессов и основных исполнителей. Данный метод позволяет сократить ресурсы на анализ итоговой информации, но увеличивает ответственность руководства за установку правильных целей (показателей результативности).

Также существует следующее разделение методик оценки результативности СМК:

- а) анализ степени достижения установленных числовых значений показателей целей в области качества и/или всей деятельности организации;
- б) оценка результативности процессов СМК;
- в) оценка функционирования выделенных объектов, существенно важных для организации (качество продукции, технологическая дисциплина, удовлетворенность потребителей, результаты внутренних аудитов, метрологическое обеспечение, качество закупок, управление документацией, затраты на качество, качество испытаний);
- г) анализ работы структурных подразделений предприятия;
- д) анализ выполнения пунктов стандарта, содержащего требования к построению СМК и ее функционированию;
- е) информация о результатах внутреннего аудита.

Проведенный анализ подходов к оценке результативности системы менеджмента качества позволяет сделать вывод о том, что не существует единственно верного метода, применимого для всех организаций и ситуаций. Выбор конкретной методики зависит от целей оценки, уровня зрелости предприятия, сложности бизнес-процессов и требований заинтересованных сторон.

Обобщая существующие наработки, можно утверждать, что эффективная система оценки должна носить комплексный характер. Она не может ограничиваться лишь расчетом интегрального коэффициента. Целесообразно сочетать количественные методы (балльный, прямой счет) с качественным анализом результатов внутренних аудитов, удовлетворенности потребителей и финансовых показателей. Дальнейшее совершенствование систем оценки должно быть направлено на поиск баланса между полнотой анализа и оперативностью получения результатов, а также на адаптацию существующих методик к цифровой трансформации процессов управления.

Библиографический список

1. Гуляева К.А., Артемьева И.Л. Инструментарий для проектирования систем понятий и баз знаний предметных областей с объектами сложной структуры // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 87. С. 62-77.
2. Бочаров В.А., Волосатова Т.М., Филиппов М.В., Чичаева Л.В., Продан С.А. Декомпозиция и агрегация функциональных моделей систем / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 89. С. 85-93.
3. Цуканова Н.И., Александров В.В., Головкин Н.В., Шурыгина О.В. Применение искусственных нейронных сетей и машинного обучения к оценке качества коллективно-договорных актов в сфере образования / Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 86. С. 122-132.
4. Рубцова А.А., Губарев А.В. Подход к апробации методики оценки результативности системы менеджмента качества/ Качество продукции в АПК: контроль, управление, повышение, планирование. Сборник научных статей 2-й Международной научно-технической конференции. Курск, 2025. С. 186-189.
5. Рубцова А.А., Губарев А.В. Подходы к оценке результативности системы менеджмента качества / Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы - Биомедсистемы-2023. Сборник трудов XXXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань, 2023. С. 55-58.
6. Бусалова С., Губарев А.В., Федоськина Л.А., Егоров М.С. Содержание процесса управления человеческими ресурсами в системе менеджмента качества / Общество и экономика. 2023. № 4. С. 40-52.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИЯ О IX МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2026»	3
МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ. Секция «ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ В ТЕХНИКЕ И МЕДИЦИНЕ»	6
Каплан М.Б. Оценка неоднородности магнитного поля магнитотерапевтической ячейки.....	6
Куришев Л.П., Шоназаров П.М., Даровских С.Н. Влияние моделируемого низкоинтенсивного микроволнового излучения солнца в диапазоне частот 4,0-4,3 ГГц на физиологические свойства клеток зеленой водоросли.....	10
Горовых М.С., Мельник О.В. Разработка и оптимизация ячейки для химического травления титановых дентальных имплантов.....	14
Гилязиев Д.Ш. Система контроля температуры ребенка в инкубаторе бесконтактным методом с применением технологий компьютерного зрения.....	17
Абдиматова Т.Д. Устройство для регистрации ультразвуковых сигналов.....	21
Рысбекова А.А. Создания опытного образец прибора для поиска ультразвуковых сигнатур.....	25
Шоназаров П.М., Даровских С.Н. Моделирование и сравнительная оценка воздействия низкоинтенсивных микроволновых и акустических сигналов на кожу, кровь, мышцы и мозг человека.....	30
Шоназаров П.М., Даровских С.Н., Топольский Д.В. Моделирование и сравнительная оценка поглощения непрерывного микроволнового излучения (2, 4, 6 и 40 ГГц) в биологических тканях при фиксированной падающей интенсивности.....	38
Урюпин О.Г., Каплан М.Б. Разработка параметризованной SPICE-модели РТС-термистора для среды MULTISIM.....	45
Джамал У.А., Каплан М.Б. Алгоритм освоения компьютерной обработкой изображений на базе лабораторной установки для компьютерной томографии.....	49
Огальцов М.С. Разработка инфузионного насоса.....	54
Дмитриев О.С., Маренков Н.Ю., Дмитриев А.О. Графический пользовательский интерфейс информационно-измерительной системы исследования и моделирования процесса отверждения полимерных композитов.....	59
Гуржин С.Г., Тогулов А.С., Шуляков А.В. Автоматизированная система сканирования и измерения распределения магнитного поля индуктора комплекса хрономагнитотерапии.....	65
Тогулов А.С., Гуржин С.Г. Автоматизация измерения магнитного поля индукторов магнитотерапевтического комплекса «РЕЛАКСМАГ»	69
Тимофеева А.А., Смирнова С.В., Благовещенский А.Н. Система производственного контроля параметров медицинских одеял, предназначенных для поддержания температуры тела пациента.....	75

Булгаков Ю.А., Михеев А.А. Оценка влияния двойной модуляции на обработку электрокардиосигнала на основе сложных дискретных выборок.....	81
Ильичева К.С., Султанова Э.М., Тюрина М.М. Биоадаптационный тренажер для ускоренных тренировок пользователя бионического протеза кисти руки.....	85
Любавина М.А. Интеллектуальная система бесконтактного мониторинга сна и физического развития младенца.....	91
Румянцев С.С. Математическая модель рефлектограммы импульсного рефлектометрического уровнемера с откликами второго порядка.....	95
Кузнецова А.В., Петров И.Э., Фролов С.В. Особенности создания прототипа умных очков с функцией транскрибирования речи для инвалидов по слуху.....	100
Виклов Р.О. Разработка демонстрационного стенда и исследование эффективности применения радиосигналов для анализа вариабельности сердечного ритма.....	103
Секция «СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ».....	108
Сойко А.И., Савельева Д.А. Нормирование точности измерений на основе статистических оценок воспроизводимости.....	108
Тохтиева Л.Н., Енацкая Н.И. Маркировка товара как инструмент управления качеством.....	113
Петрова В.Е. Категорийный менеджмент в закупках предприятий.....	119
Уваева Р.Л. Повышение эффективности испытательной лаборатории на основе аналитических и процедурных моделей управления.....	123
Губарева С.В. Метрологическое обеспечение сертификационных испытаний.....	128
Губарева С.В. Организация статистического выборочного контроля продукции по альтернативному признаку.....	133
Губарева С.В. Разработка процесса управления несоответствующей работой.....	138
Рамазанов А.О. Повышение эффективности внесения изменений в структуру изделий на основе теории графов.....	144
Рамазанов А.О. Визуализация и выявление узких мест в процессе проектирования оснастки с помощью сети Петри.....	148
Ахметзянов Н.Н. Анализ стандартов и практик оценки информационной безопасности в IT-компаниях.....	152
Ахметзянов Н.Н. Показатели информационной безопасности в системе ключевых показателей эффективности IT-компаний.....	155
Низамова Р.Ф., Тухватуллина А.Э. Анализ производства при испытаниях средств измерений.....	159
Сойко А.И., Тухватуллина А.Э., Тюрина А.В. Требования к показателям метрологической надежности средств измерений с учетом их жизненного цикла.....	162

Естерекова К.С., Сойко А.И. Методологические основы анализа и прогнозирования скорости изменения метрологических характеристик расходомеров в процессе эксплуатации.....	167
Губарев А.В. Нормативно-методическое обеспечение внедрения бережливого производства в деятельность метрологической службы.....	171
Губарев А.В. Применение системы T-FLEX DOCS для автоматизации бизнес-процессов согласования технической документации.....	175
Губарев А.В. К вопросу оценки результативности системы менеджмента качества.....	179

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ –
– СТНО-2026**

Научное издание

В 11 томах

Том 11

Под общей редакцией О.В. Миловзорова.

Подписано в печать 15.06.26. Формат 60x84 1/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л..

Тираж 100 экз. Заказ №.

Рязанский государственный радиотехнический университет,
Редакционно-издательский центр РГРТУ,
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

ISBN 978-5-7722-0457-3



9 785772 204573 >