

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.317.1

*А.Н. Кабанов, Г.И. Нечаев, Д.Н. Фоломкин*

### ОПЕРАТИВНЫЙ АЛГОРИТМ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА КОНТРОЛИРУЕМОГО ПРОЦЕССА С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

*Предложена методика формирования сигнала сложной формы релейно-ступенчатого вида, позволяющая сократить число вычислительных операций для оперативного анализа контролируемого процесса.*

***Ключевые слова:** оперативный алгоритм спектрального анализа, аппроксимация сигнала, функции сложной формы, релейно-ступенчатые функции, алгоритм определения масштаба времени, оптимальный масштаб времени.*

**Введение.** Спектральные методы представления сигналов получают в технических приложениях все большее распространение. Предположим, что наблюдаемый сигнал имеет вид:

$$y(t) = \vec{\varphi}^T\left(\frac{t}{T}\right) \cdot \vec{C}, \quad (1)$$

где  $\vec{C} = \{c_i\}$ ,  $T$  – параметры, подлежащие определению; параметр  $T$  в (1) выступает в роли масштабного коэффициента; система функций  $\vec{\varphi}$  ортогональная на интервале  $(0, \infty)$ . Однако при цифровой реализации решение задачи аппроксимации сигнала (1) проводится на основе наблюдения сигнала на конечном интервале в дискретные моменты времени. Подобная задача возникает при идентификации линейных измерительных датчиков, импульсная переходная характеристика которых определяется на интервале  $(0, \infty)$  [1]. Выбор конечного интервала приводит к нарушению условий ортогональности системы базисных функций.

Целью данной статьи является разработка методики формирования сигналов сложной формы релейно-ступенчатого вида, позволяющей сократить число вычислительных операций при определении  $\vec{C}$ . Для определения неизвестного масштаба  $T$  предлагается методика, основанная на вычислении коэффициентов  $\vec{C}$  только при двух различных масштабах времени. Предложенный в статье подход повышения

оперативности алгоритма спектрального анализа был проверен с помощью ряда численных экспериментов при наличии помех типа белого шума и показал высокую эффективность по числу вычислительных операций и точности аппроксимации сигнала.

#### Решение задачи

**1. Алгоритм построения релейно-ступенчатых функций с треугольной матрицей обращения.** Известный подход для определения коэффициентов  $c_i$  в (1) основан на вычислении по формуле вида

$$c_i = \int_0^{\infty} y(t) \cdot \varphi_i(t) dt.$$

Умножение сигнала  $y(t)$  на модулирующую функцию  $\varphi_i(t)$  требует большого количества вычислений при цифровой реализации. С целью упрощения вида модулирующей функции и запоминания меньшего количества ее значений без существенного ухудшения точности аппроксимации сигнала можно использовать модулирующую функцию  $\psi_j(nT_k)$ ,  $j = \overline{1, N}$ , релейно-ступенчатого вида с конечным числом уровней  $Q_{1j}, Q_{2j}, \dots, Q_{Lj}$ . Моменты переключения  $n_j T_k$  берутся теми же самыми, что и в исходной функции  $\varphi_j(t)$ .

Для определения уровней  $Q_{1N}, Q_{2N}, \dots, Q_{LN}$

решается задача линейного программирования – найти максимум функции

$$J_N = Q_{1N} \sum_{n=0}^{n_1-1} \varphi_N(nT_k) + Q_{2N} \sum_{n=n_1}^{n_2-1} \varphi_N(nT_k) + \dots + Q_{LN} \sum_{n=L}^M \varphi_N(nT_k) \quad (2)$$

при выполнении условий

$$Q_{1N} \sum_{n=0}^{n_1-1} \varphi_i(nT_k) + Q_{2N} \sum_{n=n_1}^{n_2-1} \varphi_i(nT_k) + \dots + Q_{LN} \sum_{n=L}^M \varphi_i(nT_k) = 0, \quad i = \overline{1, N-1}; \quad (3)$$

$$Q_{1N} = 1,$$

где  $M$  – количество наблюдаемых временных отсчетов.

Аналогичная задача решается для уровней  $Q_{1N-1}, Q_{2N-1}, \dots, Q_{LN-1}$  для функций  $\psi_j(nT_k)$ ,  $j = \overline{1, N-1}$ .

В таблице 1 приведены моменты переключения релейно-ступенчатых функций  $\psi_j(nT_k)$  для ортогональной системы функций Лягерра

$$\varphi_i(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \cdot \sum_{n=0}^{i-1} \frac{(i-1)!(-2\alpha)^n}{(i-1-n)!n!} \cdot t^n.$$

Таблица 1

Функция	Моменты изменения знака	Уровни $Q_i$
$\psi_1(nT_k)$	Не имеет переключений	1
$\psi_2(nT_k)$	0,5	1; -0,82
$\psi_3(nT_k)$	0,2; 1,7	1; -0,62; 0,59
$\psi_4(nT_k)$	0,2; 1,1; 3,1	1; -0,98; 0,79; -0,74
$\psi_5(nT_k)$	0,1; 0,8; 2,2; 4,6	1; -0,79; 0,63; -0,56; 0,55

Искомые коэффициенты  $\vec{C}$  определяются решением системы уравнений с треугольной матрицей

$$\sum_{n=0}^M y(nT_k) \cdot \psi_j(nT_k) = c_1 \sum_{n=0}^M \varphi_1(nT_k) \cdot \psi_j(nT_k) +$$

$$\dots + c_N \sum_{n=0}^M \varphi_N(nT_k) \cdot \psi_j(nT_k), \quad (4)$$

$$j = \overline{1, N}.$$

Выполнение условий (2) и (3) позволяет получить устойчивое решение.

Регуляризация решения при этом производится за счет ограничения числа членов в (1) и закругления структуры модулирующих функций выбором ограниченного числа уровней.

**2. Описание алгоритма определения масштаба времени непрерывных информационных процессов.** За критерий близости принимается квадратичный критерий

$$I = \int_0^{\infty} (y(t) - \sum_{i=1}^N c_i \cdot \varphi_i(\frac{t}{T}))^2 dt. \quad (5)$$

Можно, подбирая параметры  $c_i, i = \overline{1, N}; T$ , найти их значения, обеспечивающие минимум выбранного критерия. Однако этот путь сложный, длительный, так как потребует многократного численного вычисления интеграла (5) [2]. Предлагается методика на основе оценок  $\hat{c}_i$ , определённых из условия минимума критерия (5) только при двух различных значениях  $\hat{T}_1$ , а именно  $\hat{T}_1 = T_{21}$  и  $\hat{T}_1 = T_{22}$ , определить «истинные» значения параметров процесса  $T_1$  и  $c_i, i = \overline{1, N}$ . При такой постановке задачи в качестве измеряемых величин выступают уже не значения наблюдаемого процесса, а оценки коэффициентов

$$\vec{Y}_1^T = \{\hat{c}_1(T_{21}), \hat{c}_2(T_{21}), \dots, \hat{c}_N(T_{21})\}$$

и

$$\vec{Y}_2^T = \{\hat{c}_1(T_{22}), \hat{c}_2(T_{22}), \dots, \hat{c}_N(T_{22})\},$$

определённые из условия минимума критерия (5) при двух различных масштабах времени  $\hat{T}_1 = T_{21}$  и  $\hat{T}_1 = T_{22}$ , т.е. «измеряемые» величины могут быть представлены в виде:

$$\vec{Y}_1 = A^{-1}(T_{21}) \cdot \int_0^{\infty} \vec{\varphi}(\frac{t}{T_{21}}) \cdot Y(t) dt, \quad (6)$$

$$\vec{Y}_2 = A^{-1}(T_{22}) \cdot \int_0^{\infty} \vec{\varphi}(\frac{t}{T_{22}}) \cdot Y(t) dt, \quad (7)$$

где

$$\bar{\varphi}\left(\frac{t}{T_{21}}\right) = \bar{\varphi}\left(\frac{t}{T_1}\right)\Big|_{T_1 = T_{21}};$$

$$\bar{\varphi}\left(\frac{t}{T_{22}}\right) = \bar{\varphi}\left(\frac{t}{T_1}\right)\Big|_{T_1 = T_{22}};$$

$$A(T) = \int_0^\infty \bar{\varphi}\left(\frac{t}{T}\right) \cdot \bar{\varphi}^T\left(\frac{t}{T}\right) dt.$$

Подставляя в уравнения (6), (7) вместо  $Y(t)$  его аппроксимирующее выражение из (1) получаем:

$$\vec{Y}_1 = F_1 \cdot \vec{C}; \quad \vec{Y}_2 = F_2 \cdot \vec{C},$$

где

$$F_1 = A^{-1}(T_{21}) \cdot B(T_{21}, T_1);$$

$$F_2 = A^{-1}(T_{22}) \cdot B(T_{22}, T_1);$$

$$B(T_i, T_j) = \int_0^\infty \bar{\varphi}\left(\frac{t}{T_i}\right) \cdot \bar{\varphi}^T\left(\frac{t}{T_j}\right) dt.$$

Задавшись некоторым значением  $T_1 = \hat{T}_1$ , определим оценку  $\hat{C}_1$ . Эта оценка зависит от двух параметров -  $T_{21}$ ,  $\hat{T}_1$ .

$$\hat{C}_1(T_{21}, \hat{T}_1) = F_1^{-1} \cdot \vec{Y}_1,$$

где

$$F_1^{-1} = B^{-1}(T_{21}, \hat{T}_1) \cdot A(T_{21}). \quad (8)$$

Аналогично, задавшись тем же значением  $T_1$ , определим оценку  $\hat{C}_2$ . Эта оценка будет зависеть от двух параметров -  $T_{22}$ ,  $\hat{T}_1$ .

$$\hat{C}_2(T_{22}, \hat{T}_1) = F_2^{-1} \cdot \vec{Y}_2,$$

где

$$F_2^{-1} = B^{-1}(T_{22}, \hat{T}_1) \cdot A(T_{22}). \quad (9)$$

При  $\hat{T}_1 = T_1$  оценки  $\hat{C}_1(T_{21}, T_1)$  и  $\hat{C}_2(T_{22}, T_1)$  совпадут (при отсутствии помех). На практике за истинное значение  $T_1$  принимается значение  $\hat{T}_1$ , при котором величина квадратичного критерия

$$Q = [\hat{C}_1(T_{21}, \hat{T}_1) - \hat{C}_2(T_{22}, \hat{T}_1)]^T \times \\ \times [\hat{C}_1(T_{21}, \hat{T}_1) - \hat{C}_2(T_{22}, \hat{T}_1)] = \sum_{i=1}^N \Delta c_i^2 \quad (10)$$

принимает минимальное значение.

Коэффициенты матриц  $F_i^{-1}$ ,  $i=1,2$  зависят

лишь от отношения  $T_1/T_{21}$  в уравнении (8) и от отношения  $T_1/T_{22}$  в уравнении (9). Матрицы  $F_i^{-1}$  могут быть протабулированы заранее для выбранной системы функций  $\varphi\left(\frac{t}{T_1}\right)$ . В ОМО

РГРТУ таблицы сданы в электронном виде (регистрационный номер 1552).

**3. Демонстрационный пример применения оперативного алгоритма спектрального анализа контролируемого процесса.** В качестве наблюдаемого принят переходный процесс звена 2-го порядка

$$h(nT_k) = 1 - 1,15 \cdot \exp(-0,5 \cdot nT_k) \times \\ \times \sin(0,87 \cdot nT_k + 1,05),$$

где  $T_k = 0,1$  – шаг квантования,  $nT_k = 110$  – интервал наблюдения.

Аппроксимируем процесс  $y(t) = h(t) - h(\infty)$  с помощью ортогональной системы функций Лягерра. Коэффициенты разложения  $c_i$  определены путем решения системы (4) при двух значениях масштаба  $T_{21}=1$  и  $T_{22}=10$ .

Таблица 2

T	C1	C2	C3	C4	C5
1	-1,37	1,17	-0,78	0,29	0,07
10	-1,91	-0,97	-0,08	0,44	0,36

Оптимальный момент  $T$ , найденный на основе минимизации критерия (10), равен 5.

На рисунке 1 сплошной линией представлен исходный процесс  $y(t)$ , пунктирной линией представлена его аппроксимация  $y_{apr}(t)$ .

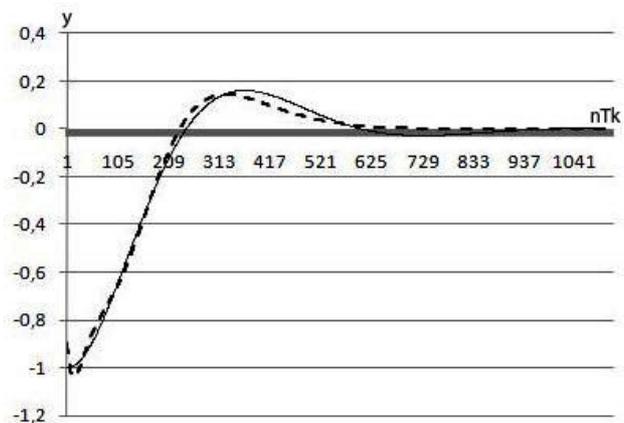
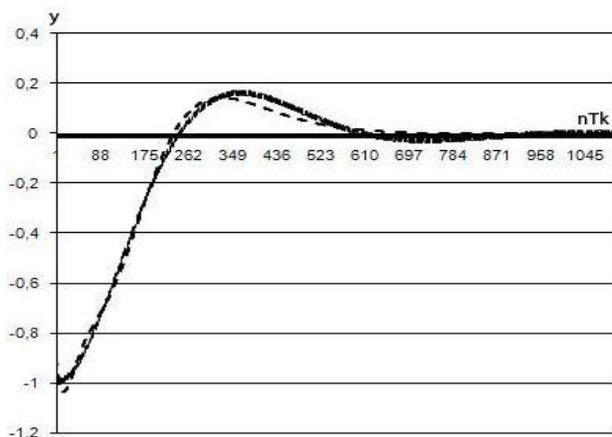


Рисунок 1 - Результат аппроксимации с помощью функций сложной формы

При наличии помех типа белого шума с интенсивностью 0,05 результат аппроксимации показан на рисунке 2.



**Рисунок 2 - Результат аппроксимации при наличии помехи**

Сплошной линией представлен исходный процесс  $y(t)$  с помехой, пунктирной линией представлена его аппроксимация  $y_{apr}(t)$ .

Относительная ошибка аппроксимации

$$\sigma = \frac{\int_0^{\infty} (y(t) - y_{apr}(t))^2 dt}{\int_0^{\infty} y(t)^2 dt} .$$

При этом при отсут-

ствии помехи  $\sigma = 0,0065$ , при наличии помехи  $\sigma = 0,033$ .

**Выводы.** В статье рассмотрены возможности построения универсального (для различных систем непрерывных функций и с различными масштабами времени) фильтра с ограниченным числом уровней квантования для оперативной оценки параметров функции при дискретном наблюдении процесса. Предварительно рассчитанные матрицы преобразования (8) и (9) в относительном масштабе времени позволяют использовать предложенный алгоритм для обработки разномасштабных сигналов (с различной шириной спектра) с помощью одной и той же программы или одного и того же аппаратного устройства.

#### **Библиографический список**

1. Идентификация и диагностика систем: учебник для студ. высш. учеб. заведений / А.А. Алексеев, Ю.А. Кораблев, М.Ю. Шестопапов. — М.: издательский центр «Академия», 2009. — 352 с.
2. Методы и средства идентификации динамических объектов / А.А. Бессонов, Ю.В. Загашвили, А.С. Маркелов. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1989. — 280 с.

УДК 621.313: 621.387

**Н.М. Верещагин, С.А. Круглов, А.А. Серезгин**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАСПАДАЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМЫ В ТИРАТРОНЕ, ВКЛЮЧЕННОМ В СХЕМЕ С ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ**

*Представлены экспериментальные исследования влияния тока анода и напряжения анода на скорость изменения сопротивления распадающейся плазмы. Показано, что увеличение анодного тока приводит к снижению скорости нарастания сопротивления распадающейся плазмы при фиксированном напряжении анода, а увеличение анодного напряжения при фиксированном токе анода приводит к более раннему увеличению скорости нарастания сопротивления распадающейся плазмы.*

**Ключевые слова:** сопротивление распадающейся плазмы, время выключения, тиратрон.

**Введение.** Высоковольтная наносекундная импульсная техника на настоящий момент имеет два основных направления своего развития. Одно из них заключается в проведении различных исследовательских программ в таких областях, как ускорительная техника, лазерная техника, мощная СВЧ-электроника, управляемый термоядерный синтез и пр. Второе, получившее интенсивное развитие в

последнее время, основано на технологическом применении мощных наносекундных импульсов. В рамках этого направления разрабатываются новые технологии для решения экологических задач по очистке выбросов электрических и тепловых станций, удалению токсичных примесей из атмосферы, обработке отходов медицины и вредных производств, очистке воды, стерилизации различной продукции.

Создаются новые радиолокационные и радиационные технологии, проектируются промышленные комплексы для обогащения трудных руд редкоземельных металлов.

Все вышеперечисленные устройства требуют для своей работы надежных генераторов высоковольтных импульсов. Существует два способа построения таких генераторов: первый, классический, на основе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ); второй - на основе индуктивных накопителей энергии (ИНЭ).

В первом случае происходит накопление энергии электрического поля в высоковольтных емкостных накопителях, а затем передача энергии в нагрузку через замыкающие устройства - сильноточные наносекундные коммутаторы [1]. Во втором случае происходит накопление энергии в магнитном поле индуктивного контура с током, передача энергии в нагрузку происходит посредством размыкающих устройств - прерывателей тока [1].

В настоящее время большой интерес проявляется к генераторам высоковольтных импульсов, построенных на основе ИНЭ. Это обусловлено рядом их преимуществ перед классическими генераторами с ЕНЭ:

- в современных импульсных конденсаторах электрическое поле, длительно выдерживаемое диэлектриком, достигает значений порядка  $10^6$  В/см, при этом плотность энергии составляет около  $10^2$  Дж/дм<sup>3</sup>. Плотность запасаемой энергии в индуктивных накопителях определяется предельно допустимыми магнитными полями, которые ограничены механической прочностью материалов индуктивных накопителей. При этом плотность магнитной энергии может достигать величины  $10^5$  Дж/дм<sup>3</sup>;

- питание генератора на основе ИНЭ осуществляется от низковольтных источников;

- генераторы с индуктивными накопителями имеют меньшие массогабаритные показатели по сравнению с генераторами на основе емкостного накопителя энергии;

- при использовании ИНЭ обеспечивается качественно иной способ передачи энергии в нагрузку.

Однако для работы генераторов на основе ИНЭ требуются надежные прерыватели, способные многократно обрывать ток. В последнее время основное внимание уделяется применению в этом качестве газоразрядных и полупроводниковых (SOS-диодов) размыкателей тока.

Наиболее удобным является использование при построении генераторов на основе ИНЭ газоразрядных коммутаторов с самообрывом разряда [2, 3]. Их использование позволяет существенно упростить схему генератора, так как один и тот же коммутатор используется для накопления энергии в индуктивности (замыка-

ния тока) и для передачи энергии от индуктивности в нагрузку (размыкания тока). В схемах с использованием SOS-диодов для накопления энергии в индуктивности применяется дополнительный коммутатор, в качестве которого используется газоразрядный коммутатор. Кроме того, газоразрядные прерыватели тока способны восстанавливать свои свойства после срывов в работе (пробоев, перенапряжений, перегрузок и т.д.) в отличие от полупроводниковых прерывателей.

Проведенные ранее исследования показали, что в качестве размыкателей возможно применение классических газоразрядных коммутаторов тока (тиратронов, псевдоискровых разрядников и др.), разработанных для использования в схемах ЕНЭ [2, 3]. При этом значительно повышается максимальное рабочее напряжение коммутаторов, так использование в качестве размыкателя тиратрона ТГИ2-500/20 (максимальное рабочее напряжение в схеме с ЕНЭ 20 кВ) позволяет получать на нагрузке импульсы напряжения амплитудой 90 кВ. Таким образом, электропрочность газоразрядных коммутаторов тока в схеме ИНЭ возрастает минимум в 4,5 раза.

По результатам выполненных экспериментов установлено, что генератор высоковольтных импульсов с ИНЭ и газоразрядными прерывателями тока способен формировать на нагрузке импульсы напряжением до 100 кВ, с током до 1 кА, временем нарастания переднего фронта 150-200 нс, частотой следования импульсов 1 кГц. При этом питание генератора осуществляется от низковольтного источника напряжения  $1\div 3$  кВ, то есть коэффициент умножения входного напряжения составляет более 30. В случае использования в качестве прерывателей SOS-диодов коэффициент умножения входного напряжения составляет 6 [4].

Цель работы – исследование зависимости сопротивления плазмы на стадии выключения от параметров генерируемых импульсов.

**Основная часть.** Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой представлена на рисунке 1. Ток, протекающий через прибор, измерялся с помощью пояса Роговского, напряжение на аноде - с помощью делителя R1, R2, осциллографом RIGOL DS1042C.

Принцип работы схемы заключается в следующем. При подаче напряжения питания  $E_{II}$  заряжается конденсатор  $C$ , на аноде коммутатора  $VI$  устанавливается напряжение, регулируемое от 0 до 3 кВ. После подачи импульса управления на сетку  $VI$  он открывается, и по

цепи  $+E_{II} - L - VI - -E_{II}$  протекает ток. Индуктивность  $L$  запасает энергию. Через некоторый интервал времени ток обрывается, и на аноде прибора возникает высоковольтный импульс напряжения. Энергия, накопленная в индуктивности, передается в нагрузку, формируя импульс высокого напряжения. Ток, протекающий через коммутатор, переключается в нагрузку. Далее процесс повторяется.

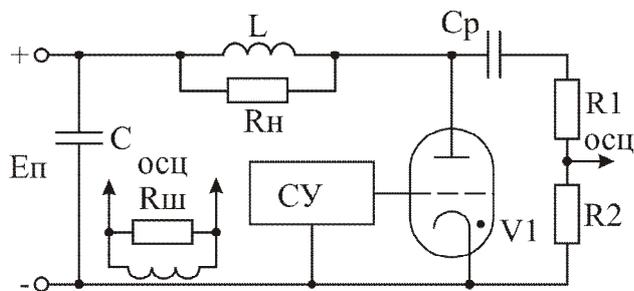


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Для изучения влияния параметров генерируемых импульсов на сопротивление плазмы в момент обрыва снимались семейства осциллограмм напряжения на аноде и тока через прибор в момент выключения (рисунок 2). При этом одна из измеряемых величин (ток или напряжение) фиксировалась. Сопротивление плазмы является динамической величиной, которая зависит от времени выключения прибора. Поэтому результирующими характеристиками являются семейства зависимостей сопротивления плазмы на стадии выключения от времени коммутации при изменении параметров генерируемых импульсов. Время выключения прибора определялось на уровне 0,1–0,9 спада тока через прибор.

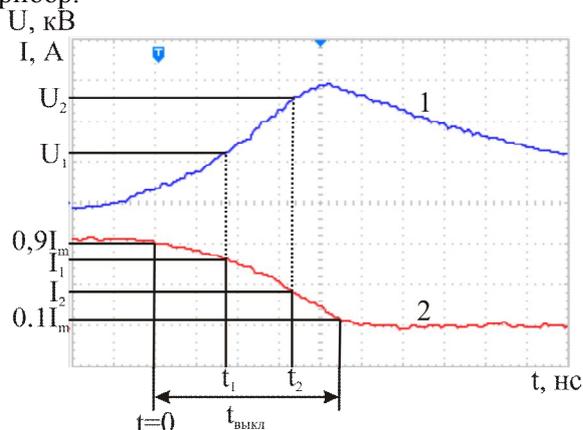


Рисунок 2 – Осциллограммы напряжения на аноде – 1 и тока через прибор – 2 ( $U=15$  кВ/дел,  $I=200$  А/дел,  $t=50$  нс/дел) в момент выключения

Порядок определения сопротивления плазмы показан на рисунке 2. Процесс выключения начинается в момент времени  $t=0$ . После начала

процесса выключения для каждого момента времени определяются ток через прибор и напряжение на аноде. Затем по закону Ома определяется сопротивление плазмы для каждого момента времени.

На рисунке 3 представлены зависимости сопротивления плазмы от времени при фиксированном напряжении анода и различных токах через прибор.

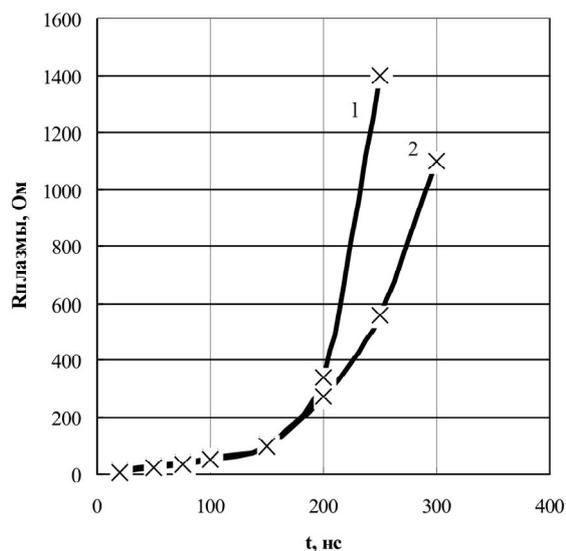


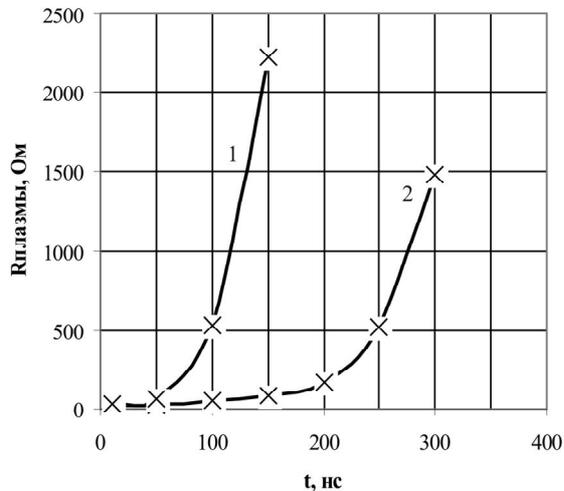
Рисунок 3 – Зависимости сопротивления плазмы от времени при фиксированном напряжении анода  $U_a=150$  А при различных токах анода (1- $I_a=100$  А, 2-  $I_a=400$  А)

Скорость роста сопротивления плазмы во времени с увеличением тока через прибор при фиксированном напряжении анода уменьшается (рисунок 3). Это обусловлено тем, что тиратрон находится в открытом состоянии более длительное время в связи с увеличением начальной концентрации зарядов в анодно-сеточной камере в момент коммутации.

Увеличение анодного напряжения при фиксированном токе анода приводит к увеличению скорости роста сопротивления плазмы во времени (рисунок 4). Увеличение скорости роста сопротивления плазмы с ростом напряжения анода обусловлено увеличением напряженности поля в пространстве сетка – анод, что приводит к увеличению скорости распада плазмы в анодно-сеточной камере.

**Закключение.** В результате проведенных экспериментов установлено, что увеличение анодного тока приводит к снижению скорости нарастания сопротивления распадающейся плазмы при фиксированном напряжении анода. А увеличение анодного напряжения при фиксированном токе анода приводит к более раннему увеличению скорости нарастания сопротивления

распадающейся плазмы (более быстрому выключению тиратрона).



**Рисунок 4 - Зависимости сопротивления плазмы от времени при фиксированном токе анода  $I_a=150\text{А}$  при различных напряжениях (1- $U_a=55\text{ кВ}$ , 2-  $U_a=5\text{ кВ}$ )**

Работа выполнена в рамках реализации НИР «Исследование обрывных явлений в диафрагмированной плазме газоразрядного коммутатора тока, включенного в схеме индуктивного накопителя энергии» ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

#### **Библиографический список**

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электротехника. - М.: Наука, 2004.
2. Верецагин Н.М., Круглов С.А. // ПТЭ. 2002. № 2. - С.82.
3. Верецагин Н.М., Круглов С.А. // ПТЭ. 2002. № 6. - С.56.
4. Словицкий Б.Г. Малогабаритные генераторы высоковольтных наносекундных импульсов на основе SOS -диодов. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2004.

УДК 658.562

**С.А. Батуркин, Е.Ю. Батуркина, А.М. Гостин, И.В. Сигинов, А.А. Скунцев, А.А. Фокина**

## **ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ОБУЧЕНИЕМ**

*Приводятся основные схемы управления учебным процессом в системах дистанционного обучения, приводится обобщенная классификация систем управления обучением. Описываются алгоритм параметрической адаптации и варианты его применения для управления процессом обучения в адаптивных обучающих системах.*

**Ключевые слова:** система управления обучением, параметрическая адаптация, алгоритм, кластеризация, статистический, идентификация.

**Введение.** Ключевыми моментами организации обучения являются накопление и управление информацией о состоянии учебного процесса в режиме реального времени. Развитие информационно-вычислительных средств позволило создать системы, обеспечивающие комплексное управление учебным процессом, – системы управления обучением (LMS - системы).

Одним из самых труднореализуемых вариантов организации учебного процесса является схема с нелинейной структурой построения курса. Для каждой порции учебной дисциплины в системе задано несколько вариантов изложения материала, различающихся по степени

подробности, глубине изложения, а также несколько вариантов предлагаемых в конце каждой порции проверочных заданий с различными уровнями сложности. Данная система адаптируется по глубине, степени подробности изложения изучаемого материала и сложности проверочных заданий, что позволяет ей формировать индивидуальную траекторию обучения.

Чаще всего в подобных системах реализуются два вида адаптации:

- параметрическая;
- структурная.

По ряду причин, в числе которых простота и скорость вычислений, оптимальным вариантом

организации нелинейной структуры процесса обучения является использование параметрической адаптации [1].

**Постановка задачи.** Качество учебного процесса напрямую зависит от того, какого уровня сложности  $S_i$  материал выдается на каждом этапе обучаемому с уровнем знаний  $L_j$ . В случае несоответствия уровня сложности материала уровню подготовки студента могут возникнуть две возможных проблемы:

-  $S_i \ll L_j$  – обучающийся изучает материал, уровень сложности которого ниже уровня развития его способностей, что приводит к снижению показателя уровня знаний  $L_j$ ;

-  $S_i \gg L_j$  – обучающийся изучает материал, уровень сложности которого намного выше уровня развития его способностей, что приводит к тому, что показатель уровня знаний  $S_i$  не увеличивается в процессе обучения.

Перечисленные проблемы легко устраняются посредством коррекции процесса обучения в ходе адаптации. Существует достаточно большое количество моделей адаптации, которые могут использоваться в управлении учебным процессом:

- Буша — Мостеллера;
- Миллера—Мак-Гилла;
- Хала;
- Терстоуна;
- Рестла;
- Кричевского [2].

Та или иная модель применяется в зависимости от целей и задач обучения. Одна из важнейших задач обучения состоит в том, чтобы обучаемый наилучшим образом запомнил определенные порции информации, которые в дальнейшем будем называть учебными единицами. Примером таких единиц являются свойства математических структур, операторы алгоритмического языка, исторические даты и т. д.

Типовой алгоритм обучения представляет собой правило выбора порции обучающей информации  $U$ , которую необходимо заучить. Эффективность  $Q$  такого обучения, — например число известных ученику учебных единиц, можно оценивать по результатам периодического контроля обучаемого. Очевидно, что эффективность зависит от алгоритма обучения  $U$  и личностных качеств ученика  $\omega$ :

$$Q = Q(U, \omega). \quad (1)$$

Эти свойства заранее не определены в явном виде и могут быть получены лишь в результате громоздкого процесса идентификации.

Обучение естественно сделать адаптивным согласно индивидуальным особенностям  $\omega$

обучаемого, которые могут изменяться в процессе обучения, т. е.:

$$\omega = \omega(t). \quad (2)$$

Адаптация осуществляется путем соответствующего выбора порции  $U$  обучения, т. е. посредством решения задачи адаптации:

$$Q(U, \omega(t)) \rightarrow \min_U \Rightarrow U^*_{\omega(t)}, \quad (3)$$

где  $U^*_{\omega(t)}$  — оптимальная порция обучения, зависящая от индивидуальных черт  $\omega(t)$  ученика.

Вид зависимости (1) обычно неизвестен, но иногда можно оценивать  $Q$ , т.е. иметь наблюдения функции (2) в определенные моменты времени. Поэтому для решения задачи (3) можно воспользоваться методами адаптации, т.е. такого изменения порции  $U$  в процессе обучения, чтобы поддерживать критерий (1) в экстремальном состоянии в течение всего процесса обучения. Если имеются альтернативные алгоритмы обучения, то задача выбора алгоритма решается методами альтернативной адаптации.

Однако такой подход нельзя считать эффективным. Естественным развитием поиска наилучших методов обучения является синтез модели (2) ученика как объекта управления (обучения). Синтез модели нужно проводить адаптивно, т. е. не нарушая процесса обучения. Параметризуем модель (2):

$$\omega = \varphi(C, t), \quad (4)$$

где  $\varphi$  — выбранный оператор модели, а  $C = (c_1, \dots, c_q)$  — параметры модели конкретного ученика, которые обычно оцениваются в процессе обучения методами адаптации. Для решения этой задачи необходимо воспользоваться методами параметрической адаптации. Располагая моделью (4) и критерием (1) эффективности обучения, можно на каждом шаге, решая задачу оптимизации (3), определить оптимальное обучение  $U^*$  в виде порции информации, которую следует выучить данному ученику (точнее, ученику с данной моделью).

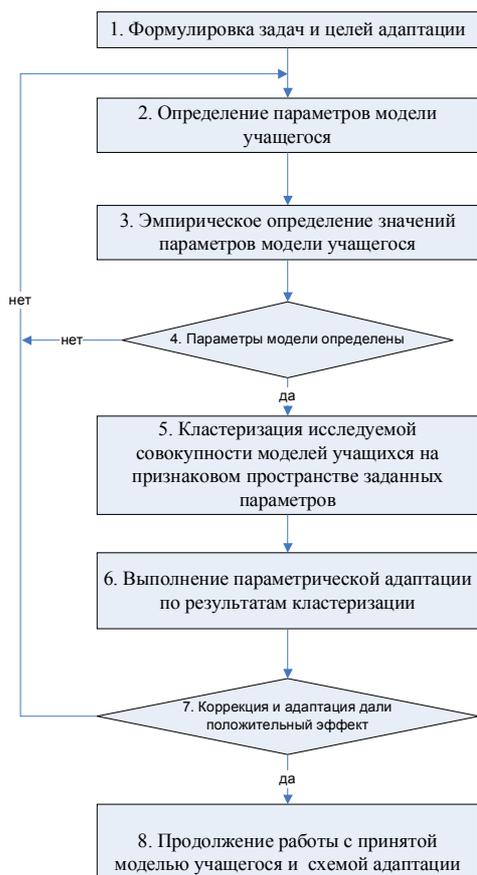
Если нужно выбрать между различными альтернативными структурами модели  $\varphi_1, \dots, \varphi_p$ , то для этого следует воспользоваться альтернативной адаптацией. Задача эффективного обучения связана с решением задачи адаптации алгоритма обучения и модели пользователя с целью максимизации эффективности процесса обучения [3].

**Реализация параметрической адаптации.** Использование параметрической адаптации в автоматизированных обучающих системах

связано с автоматизацией процесса оценки характеристик учащегося и учебного материала.

В Рязанском государственном радиотехническом университете ведется разработка системы дистанционного обучения «Академия», имеющей в своем составе модуль, отвечающий за выполнение параметрической адаптации в учебном курсе [4].

Алгоритм обучения в СДО «Академия» с использованием принципов параметрической адаптации, разработанный авторами статьи представлен на рисунке.



#### Алгоритм обучения с использованием параметрической адаптации

Формулировка целей адаптации заключается в определении критериев и тех требований к ним, выполнение которых решает задачу управления учебным процессом. Цели  $Z^*$  управления представимы в виде:

$$Z^* : \{\varphi_i \geq a_i, (i = 1, \dots, k_1)\}. \quad (5)$$

Здесь  $\varphi_i$  - критерии-функционалы, определяемые на состояниях объекта управления, в качестве которого выступает учащийся.

В общем, цели, т. е. требования, предъявляемые к этим функционалам, имеют тройственный характер: цели-неравенства, цели-равенства и экстремальные цели. Однако для задачи автома-

тизации параметрической адаптации в обучении достаточно использовать только цели-неравенства. Цели-неравенства определяют тот минимум знаний и навыков ученика, нарушение которого недопустимо. Функционал  $\varphi_i$  может выражать в виде балльной оценки уровень знаний по  $i$ -му предмету.

Определение параметров модели учащегося заключается в выборе тех характеристик, которые позволяют наиболее полно и продуктивно произвести кластеризацию данных и дальнейшую адаптацию по параметрам. Так, в СДО «Академия» в качестве параметров модели приняты:

- логит знаний учащегося  $L$  - оценивается посредством тестирований;
- баллы, получаемые на аттестациях  $I$  - выставляются преподавателем;
- академическая активность  $A$  - скорость изучения нового материала (например, усвоение учебных единиц в месяц).

Чаще всего на практике используются логит знаний и баллы итоговой аттестации.

Автоматическое определение значений параметров модели учащегося выполняется посредством модуля оценки качества тестовых материалов СДО «Академия». Логит уровня знаний - логарифмическая оценка уровня знаний для дихотомической шкалы оценивания рассчитывается по формуле:

$$L = \ln \left( \frac{p_i}{q_i} \right), \quad (6)$$

где  $p_i$  - доля правильных ответов, рассчитываемая по формуле  $p_i = Y_i/k$ , в которой  $Y_i$  - число правильных ответов испытуемого  $i$ ; символ  $k$  - общее число заданий;  $q_i = 1 - p_i$  - доля неправильных ответов. Данный вид расчетов является неотъемлемой частью процесса оценки качества педагогических тестовых заданий статистическими методами.

Кластеризация исследуемой совокупности моделей учащихся на признаковом пространстве заданных параметров быстрее и эффективнее всего осуществляется посредством применения алгоритма  $k$ -средних. Перечислим основные его этапы [5]:

- 1) сформировать начальное приближение центров всех кластеров  $y \in Y : \mu_y$  - наиболее удаленные друг от друга объекты выборки;
- 2) повторять операцию 1 в зависимости от массива данных и от требуемой точности;
- 3) отнести каждый объект к ближайшему центру:

$$y_i := \arg \min_{y \in Y} p(x_i, \mu_y), i = 1, \dots, l; \quad (7)$$

4) вычислить новое положение центров:

$$\mu_{y_i} := \frac{\sum_{i=1}^l [y_i = y] f_i(x_i)}{\sum_{i=1}^l [y_i = y]},$$

$$y \in Y, i = 1, \dots, n \quad (8)$$

5) продолжать вычисления, пока  $y_i$  не перестанут изменяться.

Для повышения качества кластеризации применяется кластеризация с частичным обучением (semi-supervised learning), когда для некоторых объектов  $x_i$  известны правильные классификации  $y^*(x_i)$ . Такое возможно, например, при применении экстремального критерия  $x_e$ , характеризующего некоторый кластер. В этом случае элемент  $x_i$ , достигающий экстремального значения  $x_e$ , может быть с допустимой погрешностью отнесен к кластеру  $y^*(x_i)$ . В системе дистанционного обучения «Академия» каждый студент описывается вектором  $X_i = \{L_i, I_i\}$ , где  $L_i$  - логит знаний  $i$ -го учащегося,  $I_i$  - баллы по итогам аттестаций. Задача кластеризации сводится к нахождению евклидовых расстояний между  $X_i$  и  $y^*$ :

$$\rho(X_i, y^*) = \sqrt{(L_i - L_e)^2 + (I_i - I_e)^2}, \quad (9)$$

где  $L_e$  и  $I_e$  - значения логита знаний и балла по итогам аттестации для центра  $j$ -го кластера.

Ввиду того, что каждый учебный модуль и тестовое задание оцениваются по уровню трудности, каждый учащийся имеет соответствующие оценки в виде баллов за аттестации и логита знаний, не составит труда после проведения кластеризации учащихся запустить процедуру параметрической адаптации. Сама адаптация проводится в кластерах, определенных на предыдущем этапе.

На данном этапе необходимо адаптировать систему обучения в связи с изменением свойств модели учащегося для достижения целей адаптивного управления.

Как правило, для выполнения данной задачи используется идентификация [6], т. е. коррекция параметров модели на основе информации, полученной в процессе обучения. В алгоритме, разработанном для системы дистанционного обучения «Академия», подобная коррекция представляет собой изменение уровня трудности учебного материала, выдаваемого обучаемому. В случае, если обучаемый не справляется с заданиями данного уровня (обучаемый не проходит пороговый уровень, логит знаний обучаемого снижается), ему выдаются задания меньшего уровня трудности. Если обучаемый

успешно преодолевает пороговый уровень оценки за выполнение учебного задания, то здесь возможны два варианта:

- логит знаний не изменяется;
- логит знаний растет.

В случае неизменности логита знаний уровень трудности (логит трудности) заданий не меняется, в случае роста логита знаний – растет логит трудности.

Однако изменение ученика в процессе обучения может затронуть структуру его модели. В этом случае параметрическая адаптация не будет эффективна и следует обращаться к коррекции структуры модели ученика. Примером такой коррекции структуры модели является переход от одной модели ученика к другой (например, с изменением числа параметров). В этом случае естественно говорить об адаптивной структуре модели объекта обучения.

Если это не позволяет управлять обучением так, как необходимо, приходится обращаться к коррекции целей обучения  $Z^*$ . В процессе такой коррекции определяется новое множество целей, которое достижимо данной системой обучения для имеющейся конкретной группы учащихся.

**Заключение.** Решение задачи параметрической адаптации в системах управления обучением имеет несколько трудностей:

- невозможно заранее задать наилучшие параметры для модели обучаемого;
- не существует универсальных алгоритмов автоматизации процессов адаптации и идентификации;
- низкая эффективность при малом количестве учебных модулей и тестов, используемых в процессе обучения по конкретной дисциплине;
- недостаточная квалификация профессорско-преподавательского состава, задействованного в процессах электронного обучения.

Однако, наряду с недостатками, алгоритм и система управления обучением на его основе обладают рядом достоинств:

- простота реализации, достигаемая за счет использования понятного большинству разработчиков математического аппарата;
- высокая скорость проведения адаптации при наличии достаточно большого объема данных по учащемуся и учебному контенту;
- валидность и высокая точность процесса адаптации;
- низкие требования к программно-аппаратному обеспечению;
- масштабируемость и простота модификации.

Дальнейшее развитие работы по данной тематике предполагает создание программного модуля «Адаптация», реализующего предложенную методику и интеграцию его в существующую систему дистанционного обучения «Академия», с целью модернизации её до уровня адаптивной обучающей системы.

#### **Библиографический список**

1. *gnsystems.net*
2. *www.distance-learning.ru*.
3. *Расстригин Л.А.* Адаптация сложных систем. — Рига: Зинатне, 1981. — 375 с.
4. *Катулев А.Н.* Исследование операций: прин-

ципы принятия решений и обеспечение безопасности - М.: Физико-математическая литература, 2000. — 320 с.

5. *Батуркин С.А., Гостин А.М., А.В. Пруцков и др.* Система внутреннего тестового контроля знаний РГРТУ: методические указания/ Рязан. гос. радиотехн. ун-т.: — Рязань, 2007. — 68 с.

6. *Уиллиамс У.Т., Ланс Д.Н.* Методы иерархической классификации // Статистические методы для ЭВМ / под ред. М. Б. Малютов. - М.: Наука, 1986.- С. 269–301.

7. *Кудрин Б.И.* Модели и алгоритмы оперативного управления / Б.И. Кудрин, В.К. Буторин, В.А. Авдеев. — М.: Электрика, 1999 — 140 с.

УДК 001.891.573

**В.Т. Дмитриев, С.О. Акимов, А.О. Акимов**

## **МЕТОДИКА ОБСЛЕДОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ Г. РЯЗАНИ НА ОСНОВНЫХ АВТОМАГИСТРАЛЯХ С ПОМОЩЬЮ GPS-ДАТЧИКОВ**

*Обоснована методика обследования транспортных потоков на основных автомагистралях с помощью GPS-датчиков. По данной методике проведено обследование транспортных потоков на примере города Рязани. Выявлены улицы с наиболее интенсивным транспортным движением, и определены часы пиковой нагрузки.*

**Ключевые слова:** транспортные потоки, управление транспортом, транспортное планирование.

**Введение.** Современные автомобильные дороги представляют собой сложные инженерные сооружения. Они должны обеспечивать максимально возможное безопасное движение потоков автомобилей с высокими скоростями.

Рост автомобильного парка в городах и повышение интенсивности дорожного движения привели к снижению скоростей движения, возникновению задержек в транспортных узлах, ухудшению условий движения, повышению загазованности и уровня шума в городской застройке, росту аварийности на улично-дорожной сети. Все это вызывает необходимость разработки эффективных мероприятий по устранению подобных негативных последствий, особенно по снижению дорожно-транспортных происшествий (ДТП) [1, 2].

Кроме того, заторы и пробки наносят огромный экономический ущерб хозяйствующим субъектам. Каждый день в пробках простаивают миллионы машин, тратятся миллионы литров горючего, тысячи тонн грузов не попадают вовремя к потребителям. Поэтому так важны рациональное управление транспорт-

ными потоками, их правильная организация. Для этого, в свою очередь, необходимо детально изучить транспортные потоки и выявить наиболее загруженные участки дорог.

В то же время в современном городе транспортная ситуация постоянно изменяется, на что влияет множество факторов. Поэтому особо важно проведение оперативного мониторинга транспортной ситуации. Все это становится возможным с внедрением современных информационных технологий, одной из которых являются GPS-датчики, обеспечивающие мониторинг положения транспорта в реальном масштабе времени.

**Цель работы** – разработка методики обследования транспортных потоков на главных автомагистралях города с помощью GPS-датчиков, а также проведение обследования транспортных потоков на примере города Рязани с целью выявления улиц с наиболее интенсивным транспортным движением и определением часов пиковой нагрузки.

**Обоснование методики.** В настоящее время датчиками системы навигации ГЛОНАСС/GPS

оснащено уже значительное количество общественного транспорта города Рязани. Для реализации данных мероприятий была создана центральная диспетчерская служба, ее работники отслеживают своевременность выхода машин на маршрут, количество рейсов, соблюдение графиков скоростного режима и расписания. Транспортные средства оборудуются терминалами на базе ГЛОНАСС и GPS, которые передают информацию о состоянии машин, а также позволяют осуществлять голосовую связь между водителем и диспетчером. По оценкам правительства Рязанской области, на сегодняшний день уже оборудовано 79 единиц пассажирского транспорта муниципальных предприятий (из них 39 троллейбусов и 40 автобусов), а также 221 маршрутное такси и 58 автобусов частных извозчиков. Данные, поступающие в диспетчерскую службу отражаются на сайте [www.bus62.ru](http://www.bus62.ru) [3] в графическом виде, удобном для пользователей.

Другой сайт, отражающий загруженность основных автомагистралей города Рязани, [www.probkib2.ru](http://www.probkib2.ru) [4]. На сайте в удобном для пользователей графическом виде показано расположение пробок и заторов на автомагистралях города.

Таким образом, для обследования транспортных потоков на главных автомагистралях города Рязани с помощью GPS-датчиков, а также проведения обследования транспортных потоков возможно провести анализ представленных выше сайтов. Анализ целесообразно проводить с интервалом не менее 0,5 часа, чтобы проследить образование основных пробок и заторов в городе. Затем полученные данные целесообразно усреднить по всем дням наблюдений и получить средние значения загруженности отдельных автомагистралей в зависимости от времени. Из анализа этих зависимостей можно определить время наибольшей нагрузки на автомагистраль, которое будет соответствовать максимальному значению. Усредняя эти графики по времени, можно сравнить загруженность автомагистралей транспортом.

Совмещая данные сайтов [3, 4], легко определить общую загруженность улиц и загруженность улиц общественным транспортом.

Таким образом, предложенная методика включает следующие пункты.

1. С помощью датчиков на базе ГЛОНАСС и GPS производится с периодом 0,5 часа анализ положения общественного транспорта в течение определенного периода времени.

2. Усреднение полученных данных по всем

дням наблюдений.

3. Выявление с помощью полученных зависимостей, а также с помощью видеосъемки участков автомобильных дорог, наиболее загруженных транспортом.

4. Построение зависимостей загруженности автомагистралей, полученных в первых трех пунктах методики, от времени наблюдения. Выявление часа наибольшей нагрузки и улиц с наибольшей загруженностью для данных видов транспорта.

5. Анализ полученных данных и выдача рекомендаций.

**Экспериментальные исследования.** Целью экспериментального исследования является апробация предложенной методики для обследования транспортных потоков на примере города Рязани.

Анализ статистики данных GPS-датчиков был проведен в период с 1 марта по 30 мая 2010 года. В результате мониторинга с частотой 0,5 часа сняты зависимости положения общественного транспорта в городе Рязани, а также загруженности основных автомобильных дорог города Рязани. По результатам измерений построены графики данных зависимостей для основных магистралей города Рязани.

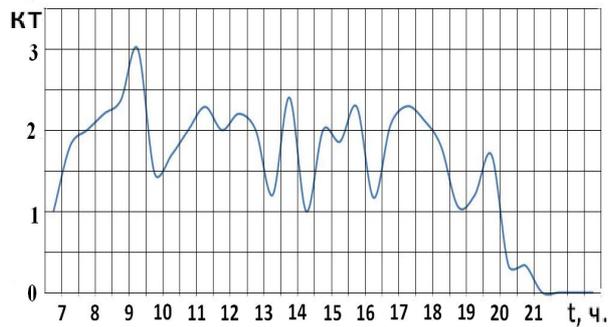
Согласно данным сайта [www.bus62.ru](http://www.bus62.ru) ежедневно в среднем на маршруте в городе Рязани находятся около 40 транспортных средств, оснащенных датчиками системы навигации ГЛОНАСС/GPS. Это позволяет отслеживать передвижение транспортных средств основных маршрутов: автобусов, троллейбусов, маршрутных такси.

На рисунке 1 для примера приведены зависимости среднего количества транспортных средств, оснащенных GPS датчиками КТ, на наиболее загруженных общественным транспортом улицах города Рязани в текущий момент времени (а – участок Первомайского проспекта от улицы Дзержинского до площади Победы, б – улица Гагарина, в – участок Первомайского проспекта от улицы Дзержинского до площади Ленина).

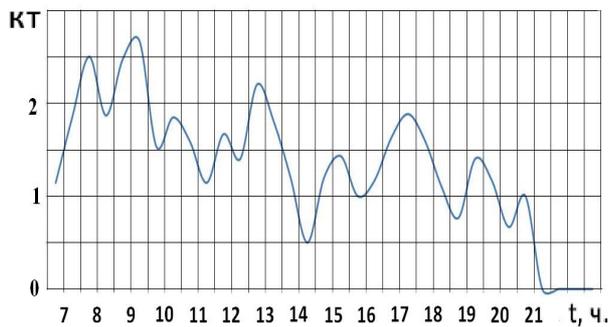
Как следует из анализа зависимостей, наибольшее количество общественного транспорта сосредоточено на Первомайском проспекте, являющемся одной из основных транспортных артерий города Рязани.

На сайте [www.probkib2.ru](http://www.probkib2.ru) [3] показана схема города Рязани, на которой с помощью GPS датчиков и видеосъемки отмечены участки дорог с затрудненным движением и пробками. Для математического учета присвоим дорогам со свободным движением значение загруженности,

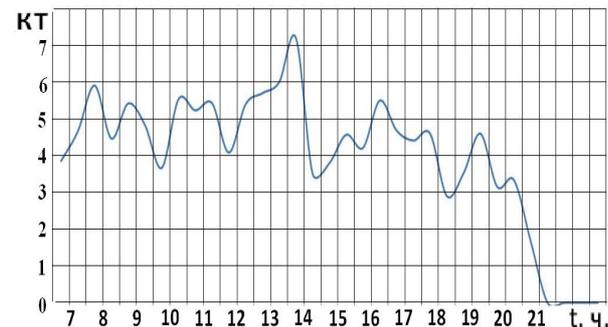
равное 0, с затрудненным движением – 1, а на дорогам с пробками – значение 2.



а



б

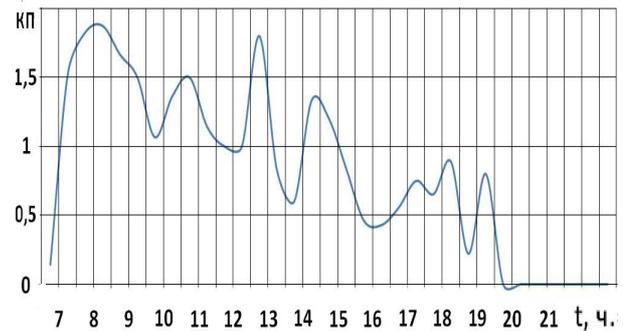


в

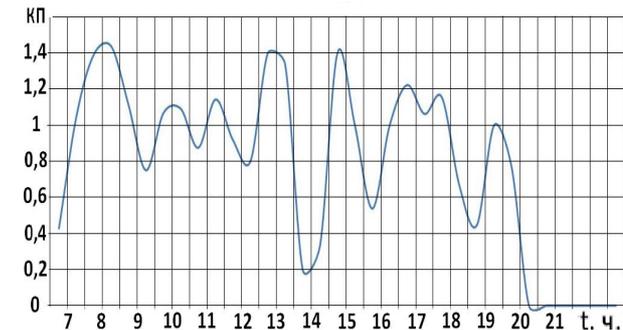
Рисунок 1

На рисунке 2 приведены зависимости количества заторов и пробок КП в данный момент времени для наиболее проблемных с точки зрения улиц города Рязани (а – Московское шоссе, участок у моста по направлению к площади Победы, б – улица Дзержинского, в – улица Гагарина от поворота с улицы Дзержинского).

В целом, анализируя снятые зависимости, можно сделать следующие выводы: наиболее загружены магистрали, ведущие в центр города или расположенные в пределах центра города, во временном интервале с 7.30 до 9.00. Далее по загрузке следует временной интервал с 12.30 до 14.00. Улицы, ведущие из города в спальные микрорайоны, загружены только два раза в сутки с 7.30 до 9.00 и с 17.00 до 18.00, а в остальное время являются свободными.



а



б



в

Рисунок 2

**Заключение.** На примере города Рязани обоснована методика обследования транспортных потоков на главных автомагистралях с помощью GPS-датчиков, а также проведение обследования транспортных потоков с целью выявления улиц с наиболее интенсивным транспортным движением и определения часов пиковой нагрузки.

Показано, что наиболее загруженными в период с 7.30 до 9.00, а также в период с 12.30 до 14.00 являются Московское шоссе (участок у моста по направлению к площади Победы) со средней загрузкой, равной 1,02, улица Дзержинского со средней загрузкой 0,98. В период с 17.00 до 18.00 наиболее загружены улицы, ведущие в спальные районы, которые свободны все другое время.

Общественный транспорт, согласно проведенному исследованию, в основном сосредоточен в районе Первомайского шоссе. Таким

образом, транспортный поток может испытывать главные затруднения на перекрестках следующих улиц: Первомайского проспекта и Московского шоссе, Первомайского проспекта и улицы Дзержинского, а также улиц Дзержинского и Гагарина.

Предложенная методика позволяет провести обследование транспортных потоков и выявить участки с затрудненным движением.

Работа выполнена в рамках контракта № П549 от 05.08.2009 «Создание технологии получения адекватной информационной модели

транспортной инфраструктуры города на основе программного комплекса Visum/Vissim PTV Vizion (на примере г. Рязани)» и финансовой поддержке Министерства образования.

#### **Библиографический список**

1. Бабков В.Ф. Современные автомобильные магистрали. – М.: Транспорт, 2-е изд. 1974. – 280 с.
2. Байэтт, Р. Уоттс. Расследование дорожно-транспортных происшествий. – М. Транспорт, 1983. – 228 с.
3. [www.probki62.ru](http://www.probki62.ru)
4. [www.bus62.ru](http://www.bus62.ru)