

ISSN 1694-5050

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

КЫРГЫЗСКАЯ АССОЦИАЦИЯ ПО  
АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ  
И КОМПЬЮТЕРНЫМ СИСТЕМАМ

# ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ № 1 (36)

Журнал входит в РИНЦ, а также в перечень  
ВАК Кыргызской Республики рецензируемых  
научных журналов, в которых должны быть опубликованы  
основные результаты диссертаций на соискание  
ученых степеней доктора и кандидата наук

Журнал издается с 1996 года.

Зарегистрирован Министерством юстиции  
Кыргызской Республики  
Свидетельство № 1503 от 26 февраля 2009 г.



БИШКЕК

2019

ИЛИМ

Проблемы автоматки и управления: Научно-технический журнал  
/ Национальная академия наук Кыргызской Республики.–  
Бишкек: Илим, 2019.– №1 (36).– 166 с.

Главный редактор  
*академик НАН КР Ж. ШАРШЕНАЛИЕВ*

Ответственный секретарь  
*доктор технических наук, доцент А.Б. БАКАСОВА*

Редакционная коллегия:

*академик РАН Ю.Г. ЕВТУШЕНКО (Россия),  
член-корр. НАН КР Р.О. ОМОРОВ (Кыргызстан),  
доктор технических наук, профессор Е.Л. ЕРЁМИН (Россия),  
доктор технических наук, профессор С.А. АЙСАГАЛИЕВ (Казахстан),  
доктор технических наук, профессор Б.И. ИСМАИЛОВ (Кыргызстан),  
доктор физ.-мат. наук, профессор А.Д. САТЫБАЕВ (Кыргызстан),  
доктор технических наук, профессор И.В. БРЯКИН (Кыргызстан),  
доктор технических наук, с.н.с. К.А. ПРЕСНЯКОВ (Кыргызстан),  
доктор технических наук Е.Л. МИРКИН,  
доктор технических наук Н.М. ЛЫЧЕНКО,  
доктор физ.-мат. наук, профессор А.А. АСАНОВ (Кыргызстан),  
доктор технических наук Д.В. ЯНКО, (Кыргызстан),  
доктор технических наук Б.Т. УКУЕВ (Кыргызстан),  
доктор технических наук Б.Т. ТОРОБЕКОВ (Кыргызстан),  
доктор технических наук Ж.Т. ГАЛБАЕВ (Кыргызстан),  
кандидат технических наук С.Н. ВЕРЗУНОВ (Кыргызстан).*

В журнале публикуются статьи по оптимизации динамических систем, моделированию и программному обеспечению, информационно-измерительным системам, а также системам автоматки и диагностики

Контакты редакции:

720071, Бишкек, проспект Чуй, 265.

Институт автоматки и информационных технологий, Кыргызская Ассоциация по автоматическому управлению и компьютерным системам.

Телефон: +996 312 39-20-36.

E-mail: [avtomatika\\_nankr@mail.ru](mailto:avtomatika_nankr@mail.ru)

Полная электронная версия журнала: <http://iait.kg/pau/>

## СОДЕРЖАНИЕ

### СОДЕРЖАНИЕ

#### УПРАВЛЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

<i>Токтошов Г.Ы.</i> Задачи оптимизации сетей инженерных коммуникаций различного назначения.....	5
<i>Самохвалова Т.П., Ниязов Н.Т., Сактанов У.А., Сатаркулов Т.К.</i> Алгоритм стабилизации температурных режимов силового трансформатора.....	12
<i>Яблочников А.М.</i> Обзор способов регулирования частоты вращения гидротурбин микроГЭС.....	21

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ОБЪЕКТОВ

<i>Бакасова А.Б., Ниязова Г.Н., Сатаркулов Т.К., Бузурманкулова Ч.М., Дюшеева Ч.К.</i> Применение сред MatLab и LabView для демонстрации динамического поведения гидроагрегата нового типа.....	30
<i>Асанова С.М., Арфан аль Хакам, Аскарбек улуу Нурлан, Актаев Э.Т.</i> Моделирование режимов работы сложных электрических сетей с древовидной структурой и разными номинальными напряжениями.....	40
<i>Калматов У.А., Сатаркулов К.А.</i> Диагностирование силовых трансформаторов по характеру распределения температурного поля в верхних слоях масла.....	53
<i>Айдарова А.Р., Исакеева Э.Б., Абдыбаева Ж.К., Бузурманкулова Ч.М.</i> Моделирование несинусоидальных режимов воздушных линий для расчета потерь мощности в них.....	58
<i>Яблочников А.М.</i> Моделирование режимов работы генератора микроГЭС с помощью виртуального прибора.....	65
<i>Урусова И.Р.</i> Численный эксперимент шунтирования витков спирали электрической дуги винтовой формы.....	72
<i>Самохвалова Т.П., Керимбеков А.К., Таирова О.К.</i> Интегрированное дифференциальное уравнение в модели управляемого процесса.....	77
<i>Сатыбаев А.Д., Кадыркулова Н.К.</i> Моделирование дистанционного обучения на основе байесовской сети.....	84
<i>Гайдамако В.В.</i> Моделирование облачной информационно-измерительной системы с помощью библиотеки SIMGRID.....	90

## **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

<i>Шаршеналиев Ж.Ш., Янко Д.В.</i> Проблемы взаимодействия и управления гетерогенными информационными потоками с помощью XMPP-сервера.....	100
<i>Толпинская Н.Б., Сычев А.М.</i> Алгоритмы обработки потоковых данных.....	110
<i>Верзунов С.Н.</i> Применение глубоких нейронных сетей для краткосрочного прогноза дальности видимости.....	118
<i>Гайдамако В.В., Авельцов Д.О.</i> К вопросу о методах повышения производительности высоконагруженных систем.....	131
<i>Кутунаев Ж.Н., Такеева А.Р.</i> Обобщенные решения волновых уравнений одного класса.....	141
<i>Лыченко Н.М., Верзунов С.Н.</i> Анализ и ARIMA-модели динамики изменения концентрации PM2.5 в атмосферном воздухе г.Бишкек.....	147

## УПРАВЛЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

---

УДК 519.179.2: 519.688

<https://doi.org/10.5281/zenodo.3252965>

**Г.Ы. Токтошов, [tgi\\_tok@rambler.ru](mailto:tgi_tok@rambler.ru)**

*Институт вычислительной математики и математической геофизики  
СО РАН, Россия*

### ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ СЕТЕЙ ИНЖЕНЕРНЫХ КОММУНИКАЦИЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассмотрены задачи оптимизации сетей инженерных коммуникаций в условиях городской застройки. Предложена новая методика моделирования сетей инженерных коммуникаций, учитывающая иерархичность структуры проектируемой сети, совместимость сети с другими сетями различного назначения. Предложен двухэтапный алгоритм поиска оптимального решения по критериям стоимости и совместимости проектируемых типов сетей с помощью эвристических подходов, основанных на моделях теории гиперсетей и «жадной эвристике». Предложенный приближенный алгоритм позволяет построить самый дешевый сетевой объект.

Ключевые слова: избыточная схема; инженерная сеть; трасса; первичная сеть; вторичная сеть; граф; гиперсеть.

**Введение.** Задачи проектирования сетей инженерных коммуникаций различного назначения (газо-, водопроводы, теплосети, сети связи и электроснабжения и т.п.) в условиях городской застройки возникают при строительстве новых или модернизации существующих сетей с целью обеспечения потребностей населенных пунктов, торговых площадок, центров обслуживания заявок и т.п.

Известные постановки задачи оптимизации сетей, и подходы к их решению основываются на общих принципах построения и эксплуатации этих сетей. В частности, для решения сложных проектных задач, заключающихся в анализе и синтезе систем сетевой структуры, используется подход разделения задачи на структурную и параметрическую оптимизации. Зачастую процесс анализа связан с инженерными изысканиями и предварительной подготовкой исходных данных.

При решении задач структурной оптимизации сетевых структур различного назначения в большинстве случаев используют методологию избыточных проектных схем [1–3], граф всех возможных трасс [4, 5], или карты влияющих факторов [6].

В целом избыточная схема (ИС) – это схема, которая должна учитывать все ограничения на плане местности, и включает в себя места расположения источников целевой продукции (информация, энергия, продукт) и потребителей, а также всевозможные (допустимые с точки зрения технической возможности и экономической целесообразности) связи между ними. Тогда задачу структурной оптимизации сетей инженерных коммуникаций в общем виде можно сформулировать следующим образом: на заданной избыточной схеме требуется выделить подсеть, соединяющую узлы производства и потребления целевой продукции таким образом, чтобы обеспечить

минимум затрат на её строительство и эксплуатацию при соблюдении различных ограничений технического и природного характера.

**Методологический подход к моделированию сетей.** Отметим, что в рамках классических подходов задача решается на одной плоскости, т.е. выделяется подсеть из заданной избыточной схемы. У такого подхода есть одно бесспорное преимущество, связанное с доступностью проведения вычислительного эксперимента на основе классических схем оптимизации, таких методов, как имитация отжига [1, 2], методы теории графов [3–5], генетические алгоритмы [6, 7] и др.

Однако следует отметить, что при решении подобных задач необходимо обратить внимание и на другую сторону этого вопроса, связанного со следующими особенностями прикладной проблемы:

- во-первых, решение нужно искать не на плоскости, как это делают авторы [1–7], а в пространстве [8, 9], учитывающем взаимодействие двух объектов (иерархичность сетей), таких как область размещения со своими технико-экономическими характеристиками и проектируемая сеть, также имеющая свою технико-экономическую характеристику, в зависимости от выбранной местности;

- во-вторых, при проектировании любой системы необходимо учесть тот факт, что любая сеть взаимодействует (сосуществует) с сетями различного назначения (уже существующими или вновь проектируемыми).

**Математическая модель.** Согласно первой особенности проектируемой сети, ее структура представляет собой четырехуровневую взаимосвязанную систему: участок земли → система фундаментов или опор → технологическая труба → целевая продукция. В таком случае применение аппарата теории графов и гиперграфов не позволяет учесть реализацию одной из представленных систем в другой. Поэтому в большинстве случаев вместо них используют другие сетевые модели: вложенные графы [10], многоуровневые комплексные сети [11], гиперсети [12], случайные гиперсети [13,14], а также другие объекты.

Приведём наиболее общее определение гиперсети [12], применяемое в нашем случае.

*Определение.* Гиперсеть  $HN = (X, V, R; P, F, W)$  включает следующие объекты:

$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – множество узлов (вершин).

$V = (v_1, v_2, \dots, v_g)$  – множество возможных трасс.

$R = (r_1, r_2, \dots, r_m)$  – множество линейных сооружений.

$P: V \rightarrow X^2$  – отображение, сопоставляющее каждому элементу  $v \in V$  множество вершин  $P(v) \subseteq X$ . Тем самым отображение  $P$  определяет граф первичной сети  $PN = (X, V)$ .

$F: R \rightarrow 2^V$  – отображение, сопоставляющее каждому элементу  $r \in R$  множество трасс  $F(r)$ , образующих простой маршрут в графе  $PN = (X, V)$ . Множество всех маршрутов  $F(r)$ , отображающее каждому ребру  $r \in R$  графа  $SN$  единственный маршрут в графе  $PN$ , назовем вложением графа  $SN$  в  $PN$ .

$W: R \rightarrow 2^{P(F(R))}$  – отображение, сопоставляющее каждому элементу  $r \in R$  множество вершин  $W(r) \subseteq P(F(r))$  в графе  $PN$ , где  $P(F(r)) = Y$  – множество вершин в  $PN$ , инцидентных трассам  $F(r) \subseteq V$ . Отображение  $W$  определяет граф вторичной сети  $SN = (Y, R)$ .

Из определения гиперсети следует, что математическая модель возможных трасс соответствует графу первичной сети  $PN = (X, V)$ , а структура инженерной сети – графу вторичной сети  $SN = (Y, R)$ . Взаимодействие этих сетей определяется гиперсетью  $HN$ .

Теперь рассмотрим возможность совмещенной прокладки параллельно идущих сетей в одном техническом коридоре. При этом необходимо учесть совместимость или несовместимость этих сетей и нормативное расстояние между ними [15, 16].

**Постановка задачи.**  $D = \{(x, y) | a < x < b, c < y < d\}$  – прямоугольная картографируемая область, на которой предполагается строительство сетей различного назначения;

$Y_{source} \subseteq D$  – множество источников георесурсов (газ, нефть, вода и т.д.);

$Y_{station} \subseteq D$  – множество пунктов переработки.

Множество вершин  $X$  графа первичной сети  $PN = (X, V)$  включает в себя множество  $Y = Y_{source} \cup Y_{station}$ .

Пусть в графе  $PN = (X, V)$  заданы следующие характеристики:

$l(v)$  – длина ветви  $v \in V$ ;

$a(v)$  – стоимость земли (аренда, налог и т.д.) на участке  $v \in V$  предполагаемой трассы;

$b(v)$  – стоимость подготовительных и строительных работ (копка траншеи, строительство коллекторов, тоннелей и опор и т.п.) на участке  $v \in V$  предполагаемой трассы;

$\gamma_1$  – коэффициент дисконтирования строительных затрат для приведения экономических показателей разных лет к сопоставимым по времени величинам).

Пусть в графе вторичной сети  $SN = (Y, R)$  заданы следующие параметры:

$\rho(r) = \sum_{v \in F(r)} l(v)$  – длина линейного сооружения (трубопровод, кабель и т.п.)  $r \in R$ ,

проходящего по ветвям  $v \in F(r)$  предполагаемой трассы;

$c(r)$  – стоимость строительства и монтажа самого линейного сооружения  $r \in R$ , соединяющего соответствующие пары узлов из  $Y$ ;

$\gamma_2$  – коэффициент дисконтирования стоимости линейного сооружения;

$d_v(r)$  – стоимость эксплуатации сетей на участках  $v \in F(r)$ .

Пусть  $T$  – множество типов ресурсов, передаваемых через сети различного назначения. Для каждого ребра  $r \in R$  зададим тип  $type(r) \in T$ . Тип ресурса однозначно определяет тип проектируемой сети.

Как было сказано выше, разные типы ресурсов могут быть несовместимы друг с другом для их прокладки в одном техническом коридоре. Для описания совместимости различных типов ресурсов используем методику, предложенную в [17].

Для этого вводится бинарное отношение  $CT \subseteq T \times T$ , которое определяется правилом: если  $(t_1, t_2) \in CT$ , то эти типы сетей могут быть проложены в одном и том же технологическом коридоре, т.е. две сети различных типов могут быть проложены в одной ветви первичной сети.

Пусть  $MinCT(t_1, t_2, \dots, t_n)$  – минимальное число непересекающихся подмножеств, на которое можно разделить типы ресурсов  $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  с учетом их совместимости.

Например, если существуют типы ресурсов  $\{t_1, t_2, t_3\}$ , такие что  $(t_1, t_2), (t_2, t_3) \in CT$ , но  $(t_1, t_3) \notin CT$ , тогда  $MinCT(t_1, t_2, t_3) = 2$ , поскольку эти типы ресурсов могут быть разделены на два подмножества  $\{t_1, t_2\}$  и  $\{t_3\}$ .

**Постановка задачи:** построить гиперсеть  $HN$ , т.е. каждому ребру  $r \in R$  графа вторичной сети  $SN$  найти соответствующий маршрут в графе первичной сети  $PN$  между заданных пар точек из  $Y = Y_{source} \cup Y_{station}$  таким образом, чтобы выполнялись все условия и ограничения, накладываемые на проектируемый тип трубопровода, причем следующий функционал должен иметь минимальное значение:

$$Q(HN) = \sum_{v \in V'} (a(v) + b(v) \cdot \gamma_1) \cdot \rho(v) \cdot MinCT(v) + \sum_{r \in R} \left( c(r) + \sum_{v \in F(r)} d(r) \cdot \gamma_2 \right) \rho(r), \quad (1)$$

где подмножество  $V' \subseteq V$  определяется следующим образом: для каждого элемента  $v \in V', \exists r \in R$  такое, что  $v \in F(r)$ . Пусть  $v \in V'$  и  $v \in F(r_i), i = 1, \dots, l(r_i), \dots, r_i \in R$ , тогда  $MinCT(v) = MinCT(type(r_1), \dots, type(r_l))$ .

Таким образом, задачи оптимизации сетей инженерных коммуникаций в современном городе, в котором подземное или открытое пространство чрезвычайно насыщено инженерными коммуникациями различного назначения, сводятся к задаче совмещенного их размещения. Отметим, что задача оптимизации сетей инженерных коммуникаций в такой постановке NP – трудна [18, 19]. Это связано с тем, что найти точного решения задачи путем непосредственного отображения ребер графа  $SN$  вторичной сети по соответствующим маршрутам на графе  $PS$  первичной сети практически нереально в силу сложности задачи, поэтому достаточно найти удовлетворительное приближение. Далее приведем метод решения задач совмещенного размещения сетей различного назначения в одном техническом коридоре (траншее, коллекторе или просто на открытой местности) с учетом их стоимости.

**Двухэтапный метод оптимизации.** В данном разделе предлагается двухэтапный алгоритм решения поставленной задачи. Сначала находится начальное приближенное решение, затем оно улучшается.

Для поиска начального решения используются «жадный» алгоритм и классический алгоритм Флойда.

Для алгоритмов Флойда и Дейкстры стоимость ветви  $v \in V$  на графе первичной сети  $PN$  равна  $(a(v) + b(v) \cdot \gamma_1 + c(r) + d(r) \cdot \gamma_2) \rho(v)$ . Для простоты будем считать  $\forall r \in R: c(r) + d(r) \cdot \gamma_2 = const$ .

Ниже описаны шаги предлагаемого алгоритма.

Этап 1 (поиск начального приближения)

**Шаг 1.** Разделить типы ресурсов на непересекающиеся подмножества

**Шаг 2.** Выбрать подмножество совместимых типов  $T'$  с наибольшим количеством ребер (для которых еще не найдено вложение в первичную сеть).

**Шаг 3.** Найти все кратчайшие пути  $(y_i, y_j), i, j = 1, \dots, n, i \neq j$  (существует ребро  $r$ ) в графе первичной сети  $PN = (X, V)$  с помощью алгоритма Флойда. Паре вершин  $(y_i, y_j)$  соответствует ребро  $r$  во вторичной сети и  $type(r) \in T'$ .

Выбрать среди них путь с минимальной стоимостью.

Осуществить вложение выбранного ребра  $r$  по кратчайшему пути  $(y_i, y_j)$  в графе  $PN$ .

Для всех  $v \in F(r)$  в графе первичной сети  $PN$   $a(v) := 0$ ,  $b(v) := 0$  (стоимость ветви равна нулю для прокладки остальных ребер).

Повторить **Шаг 3** пока для всех ребер  $r \in R$  вторичной сети, таких что  $type(r) \in T'$ , не будут найдены и реализованы кратчайшие пути.

**Шаг 4.** Присвоить изначальные значения  $a(v)$  и  $b(v)$ , которые обнулены на предыдущем шаге. Если не  $T' \neq 0$ , переходим на **Шаг 2**.

Отметим, что «жадный» алгоритм является приближенным, поэтому полученные решения не всегда оптимальны. Можно улучшить решение, найдя новый маршрут  $r \in R$ . Например, новый маршрут  $F(r)$  дешевле для выбранного  $r \in R$ , если он включает в себя большее количество ветвей  $v \in F(r)$  с нулевой стоимостью (ветви, которые уже используются для других ребер  $r \in R$ ).

Можно упорядочить ребра по некоторому правилу, например, по числу наиболее редко используемых ветвей. Отметим, что в среднем полученные результаты не очень зависят от используемого метода упорядочения.

Этап 2 (улучшение)

**Шаг 1.** Упорядочить  $r \in R$  по убыванию их веса (получим список  $\{r_i\}$ ).

**Шаг 2.** «Удалить»  $r_i$  из гиперсети  $HN$  согласно списку, т.е.  $\forall v_k \in F(r_i)$ , восстановить начальные значения  $a(v_k)$  и  $b(v_k)$ , если  $v_k$  не входит в другие ребра.

Найти новый кратчайший путь для  $r_i$  в графе  $PN$  алгоритмом Дейкстры.

Для нового ребра  $r_i: a(v) := 0$ ,  $b(v) := 0$  для всех  $v \in F(r_i)$  в графе  $PN$ .

Повторить **Шаг 2** пока все ребра  $\{r_i\}$  из списка не будут обновлены.

Можно использовать несколько итераций Этапа 2 для поиска лучших результатов.

**Численные эксперименты.** Далее приведем полученные на сегодняшний день результаты численного эксперимента по реализации двухэтапного алгоритма, полученного совместно с соавторами, представленного в [20].

В качестве первичной сети  $PN$  была взята сетка размерностью  $10 \times 10$  вершин. Количество ребер в  $SN$  для укладки в  $PN$  варьировалось от 10 до 800 (ось абсцисс на рис. 1).

Источники ресурсов и потребители произвольно размещались в сетке. Узел сетки может содержать несколько источников и потребителей. Каждому ребру случайно присваивается один из трех типов (набор типов ресурсов взят из примера в постановке задачи).

В тестируемом примере случайное размещение проектируемых сетей на заданной сетке выполняется несколько раз для каждого заданного значения числа  $M$  ребер вторичной сети  $SN$ . Найденная стоимость укладки проектируемых инженерных сетей нормируется, т.е. находится минимальная стоимость и на нее делятся все полученные значения.

На рис. 1 показана нормированная стоимость укладки сетей. Из рисунка видно, что «жадный» алгоритм обеспечивает лучший результат для небольшого числа ребер (меньше 400), а для большого числа ребер более приемлемым является алгоритм Флойда.

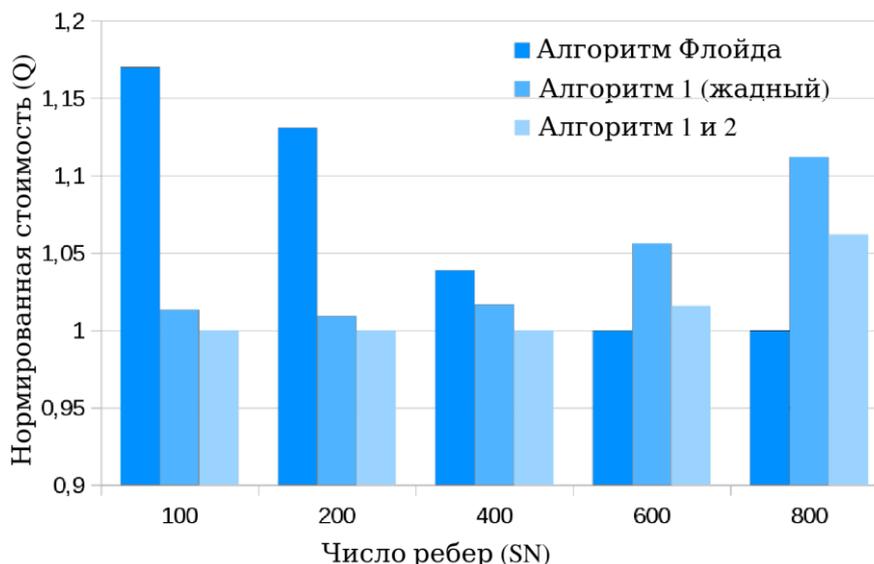


Рисунок 1 – Численные результаты: нормированная стоимость для решетки 10x10, для количества ребер от 10 до 800

**Заключение.** В работе приведена методика решения задачи оптимизации проектируемых сетей общего пользования не только по стоимостным критериям, но и по совместимости или несовместимости с существующими инженерными коммуникациями. Предложены модифицированные алгоритмы решения поставленных задач, основанные на моделях теории гиперсетей и на методах случайного поиска с адаптацией.

Предложены новая методика учета совместимости или несовместимости параллельно идущих сетей в одном направлении, а также иерархичность структур проектируемых сетей.

Данная методика была программно реализована на языке Delphi 7.0. Полученные к настоящему моменту численные результаты показывают, что все предложенные методы расчета, основанные на модели гиперсетей, в отличие от классических методов оптимизации, обеспечивают сокращение суммарной стоимости строительства и эксплуатации для заданной инженерной сети по сравнению с начальным решением и позволяют находить наиболее приемлемый вариант структуры сети с точки зрения совместимости с другими сетями, которые либо уже существуют, либо планируется построить согласно генплану современного города.

### **Литература**

1. Соловьев А.Ю. Алгоритмы структурной оптимизации и методы анализа информационных процессов в современных телекоммуникационных системах: автореф. дис. канд. техн. Наук. – Воронеж, 2011. – 18 с.
2. Стенников В.А., Чемезов А.А. Применение алгоритма перебора деревьев и метода имитации отжига для схемно-структурной оптимизации тепловых сетей // Программные продукты и системы. – 2018.– № 2 (31). – С.387–395.
3. Наумов И. В., Ямщикова И.В. Математическое обоснование выбора оптимизационной модели трассировки электрической сети // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). – 2015.– №7 (16). – С.123–127.

4. Степанов В.П. Оптимизация маршрутов на дорожной сети // Наука и образование. – 2012. – №5. – С. 1–12.
5. Степанов В.П., Степанов П.В., Шакин В.Н. Математическая модель для выбора оптимальной трассы прокладки оптического кабеля // Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC– 2013», 2–6 декабря 2013 г. – С. 7–12.
6. Мелькумов В.Н., Кузнецов И.С., Кузнецов Р.Н. Определение оптимального маршрута трассы газопровода на основе карт стоимости влияющих факторов // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. – 2009. – № 1 (13). – С. 21–27.
7. Данилов С.Ю. Методы эволюционного моделирования в оптимизации инженерных сетей // Вестник МГСУ. – 2010. – №4.– С. 435–439.
8. Попков В.К., Токтошов Г.Ы. Гиперсетевая технология оптимизации инженерных сетей в горной или пересеченной местности // Вестн. Бурят. гос. ун-та. – Сер. Математика и информатика.– Улан-Уде: Изд-во Бурят. гос. ун-та. – Вып. 9 (июнь 2010). – С. 276 – 282.
9. Попков В.К. Токтошов Г.Ы., Юргенсон А.Н. Об одном подходе к оптимизации инфраструктуры инженерных сетей // Вестник СибГУТИ. – 2012. № 3. – С.11–28.
10. Poulouvassilis, A., Levene, M.: A Nested-Graph Model for the Representation and Manipulation of Complex Objects. J. ACM Trans. Inf. Syst., vol.12, 35–68 (1994).
11. Kurant, M., Thiran, P.: Layered Complex Networks. J. Phys. Rev. Lett., vol.96, 138701-1-138701-4 (2006).
12. Попков В.К. О моделировании городских транспортных систем гиперсетями // Автоматика и телемеханика. – 2011. № 6. – С. 179–189.
13. Rodionov, A.S., Rodionova, O.K.: Random Hypernets in Reliability Analysis of Multilayer Networks. J. Lecture Notes in Electrical Engineering, 343, 307–315 (2015)
14. Rodionov, A.S., Rodionova, O.K.: Using Random Hypernets for Reliability Analysis of Multilevel Networks. In: 1st Int. Conf. on Mathematical Methods and Computational Techniques in Science and Engineering (MMCTSE 2014), ser. Mathematical Methods in Science and Engineering, pp. 119–121., Athens, Greece (2014).
15. <http://www.gaps.tstu.ru/win-1251/lab/gis/genplan.html> (дата обращения: 19.10.2018).
16. СНиП 2.07.01-89\* Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений", М., 2016. – 98 с.
17. Попков В. К. Труднорешаемые задачи теории гиперсетей // Материалы Российской конференции «Дискретная оптимизация и исследование операций». – Новосибирск, 2007. – С. 69–73.
18. Colbourn, Ch. J.: The Combinatorics of Network Reliability. Oxford University Press, New York (1987), p. 143–157.
19. Guljigit Toktoshov, Anastasiya Yurgenson, Denis Migov. Design of Utility Network Subject to Reliability Constraint // Proc. of International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, IEEE SIBIRCON 2017, Novosibirsk, Russia, 18-22 Sept. 2017 –P. 172–177.
20. Gulzhigit Y. Toktoshov, Anastasia N. Yurgenson and Denis A. Migov On a Problem of the Utility Network Design // OPTA-SCL 2018, (Springer), 8–14 July.2018, Volume 2098. – Pages 385–395.

**Т.П. Самохвалова, Н.Т. Ниязов, Т.К. Сатаркулов**

*Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР*

**У.А. Сактанов**

*Ошский университет, г.Ош. Кыргызстан*

## **АЛГОРИТМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Построены алгоритмы управления и стабилизации для системы с сосредоточенными параметрами. Объектом управления является силовой трансформатор с принудительной системой охлаждения. Алгоритмы основаны на методе динамического программирования Р. Беллмана.

Ключевые слова: оптимальное управление; стабилизация; метод динамического программирования Р. Беллмана; силовой трансформатор; принудительная система охлаждения.

**Введение.** Силовые трансформаторы относятся к основному оборудованию электроэнергетических систем. От их надежности и качества функционирования в большой степени зависят надежность и качество функционирования такого крупного электротехнического комплекса, как электропитающие системы. Одними из основных показателей, определяющими срок службы трансформаторов, в том числе его эксплуатационные характеристики, являются состояние и остаточный ресурс его изоляции. Старение и износ изоляции напрямую связаны с температурными режимами работы трансформатора в процессе эксплуатации, а также надёжной работой принудительной системы охлаждения. Поэтому контроль и регулирование процесса охлаждения важного функционального узла – принудительной системы охлаждения силовых трансформаторов, работающих при номинальных нагрузках, являются актуальными.

В работах [1, 2] приведена математическая модель изменения температурных параметров силового трансформатора (обмотки, магнитопровод, трансформаторное масло). Данная работа ориентирована на принудительное жидкое охлаждение с прокачкой. Управляющая функция характеризует температуру прокачиваемого охлажденного масла в охладителе.

В работах [3, 4] разработан метод динамического программирования решения задач оптимального управления и стабилизации с математическими моделями в обыкновенных производных. В данной работе для численных расчетов применяются [3–6]. Предварительные расчеты показали наличие скачка величины управляющей функции в начальный момент времени управления в рассмотренной модели. В настоящей работе предложено применить способ изменения величины управления с обратной связью при измерении реального состояния объекта в промежуточные моменты времени.

Предложенный подход может быть применен к расчетам для других типов охлаждения трансформаторов (воздушное с дутьем, масляно-водяное с принудительной циркуляцией масла, охлаждение негорючим жидким диэлектриком с дутьем).

### 1. Постановка задачи оптимального управления

Математическую модель изменения температуры управляемого объекта запишем в виде

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + f(t), \quad x(0) = x_0, \quad t \in [0; t_k]. \quad (1.1)$$

В численных расчетах для удовлетворительного достижения заданного желаемого состояния  $g(t)$  объекта используем минимизацию квадратичного критерия качества

$$J = \gamma_1 \int_0^{t_k} (x(t) - g)^T Q(x(t) - g) dt + \gamma_2 (x(t_k) - g)^T F(x(t_k) - g) + \beta \int_0^{t_k} p^2(t) dt. \quad (1.2)$$

Здесь  $A, Q, F$  – известные  $n \times n$  матрицы;  $B, x, f, g$  – вектор-столбцы размерности  $n \times 1$ ;  $\gamma_1, \gamma_2, \beta, t_k$  – известные постоянные;  $u(t)$  – скалярная управляющая функция из множества допустимых управлений, характеризует свойства охлаждающей среды;  $(^T)$  – символ транспонирования.

*Задача 1.1.* Найти управление  $u(t)$  и соответствующее решение  $x(t)$  уравнения (1.1), минимизирующие критерий качества (1.2).

Линейную задачу (1.1), (1.2) решаем методом динамического программирования Р. Беллмана [3, 4].

Уравнение Беллмана с обращенным временем ( $t = t_k - \tau, dt = -d\tau$ ) имеет вид

$$\frac{\partial S(t, x(t))}{\partial t} = (Ax)^T \frac{\partial S(t, x(t))}{\partial x} + \gamma_1 (x - g)^T Q(x - g) - \frac{B^T B}{4\beta} \left( \frac{\partial S(t, x(t))}{\partial x} \right)^T \frac{\partial S(t, x(t))}{\partial x}, \quad (1.3)$$

с условием  $S(0, x) = \gamma_2 (x(0) - g)^T F(x(0) - g)$ .

Оптимальное синтезирующее управление равно

$$p^0(t, x(t)) = -\frac{1}{2\beta} B^T \frac{\partial S(t, x(t))}{\partial x}. \quad (1.4)$$

В данной работе рассматривается линейная модель размерности  $n = 3$  с постоянными коэффициентами [1, 2].

### 2. Моделирование процесса охлаждения

Численное моделирование выполним по модели с нулевой температурой  $T_{00} = 0$  внешней среды:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t), \quad x(0) = x_0, \quad t \in [0; t_k]. \quad (2.1)$$

Матрица  $A$  в модели (2.1) определена в [1, 2]:

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{b_1}{a_1} & 0 & \frac{b_1}{a_1} \\ 0 & -\frac{b_2}{a_2} & \frac{b_2}{a_2} \\ \frac{b_1}{a_3} & \frac{b_2}{a_3} & -\frac{b_1 + b_2 + b_3}{a_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.0019 & 0 & 0.0019 \\ 0 & -0.0002 & 0.0002 \\ 0.0002 & 0.0001 & -0.0005 \end{pmatrix}.$$

Здесь  $a_i, b_i$  ( $i = \overline{1, 3}$ ) – заданные постоянные. Даны начальные условия:

$x_1(t_0) = 55$  – температура обмотки,

$x_2(t_0) = 60$  – температура магнитопровода,

$x_3(t_0) = 35$  – температура трансформаторного масла.

Расчетный интервал времени  $t_k = 40000$  с (11.11 часов).

Определитель  $D_A$  данной матрицы  $A$  равен  $D_A = -9.7681 \cdot 10^{-11}$ . Система (2.1) асимптотически устойчива, корни характеристического уравнения равны  $\lambda_1 = -0.0021$ ;  $\lambda_2 = -0.0004$ ;  $\lambda_3 = -0.0001$ .

Графики и величины компонент  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ ,  $x_3(t)$  при температуре внешней среды  $T_{00} = 0^\circ\text{C}$  приведены на рис. 2.1 и в табл. 2.1, соответствуют графикам в [2] при  $t_k = 20000$ .

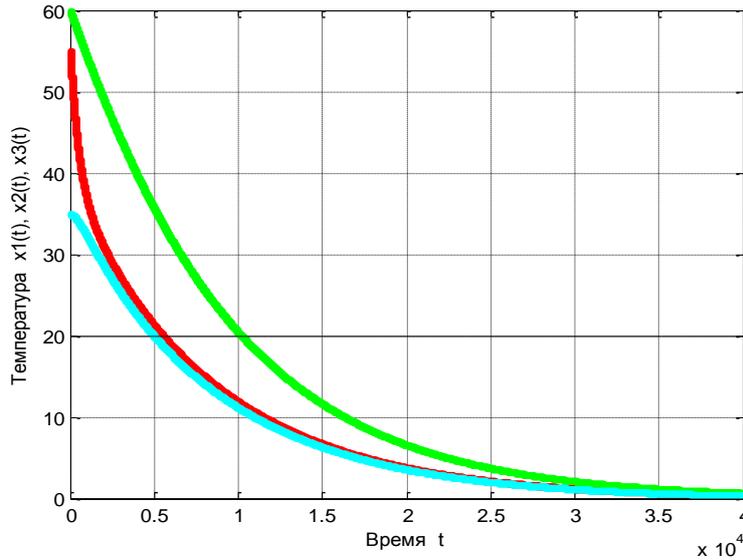


Рисунок 2.1– Остывание по модели (2.1) на интервале  $t_k = 40000$ ,  $T_{00} = 0$

Для наглядности возьмем  $t_k = 10000$ ,  $n_0 = 11000$ ,  $u(t) \equiv 0$ , получим рис. 2.2 и табл. 2.1.

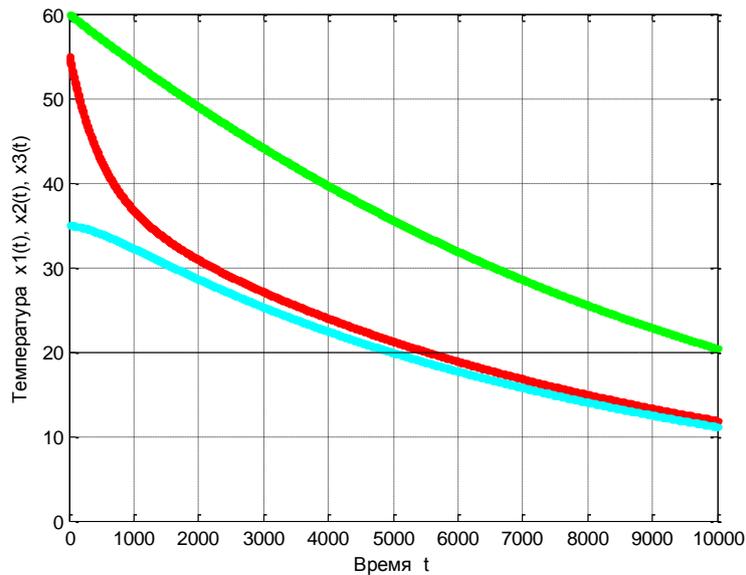


Рисунок 2.2 – Остывание по модели (2.1) на интервале  $t_k = 10000$ ,  $T_{00} = 0$

Таблица 2.1

Остывание по модели (2.1) при  $T = 10000$  с шагом 1000 (через каждые 16.6 минут)

Обмотки	Магнитопровод	Масло	Величина управления в модели
55.0000	60.0000	35.0000	0
37.4946	54.7427	32.5735	0
31.7210	49.9196	29.2460	0
28.0640	45.4195	26.1673	0
25.0648	41.2431	23.4390	0
22.4552	37.3928	21.0265	0
20.1516	33.8618	18.8860	0
18.1063	30.6365	16.9801	0
16.2835	27.6993	15.2783	0
14.6545	25.0305	13.7552	0
13.1957	22.6097	12.3896	0
11.8871	20.4168	11.1635	0

Введем в модель ненулевую температуру внешней среды  $T_{00} \neq 0$ .

Известно, что для моделирования изменения температуры используется закон Ньютона: скорость изменения разности температур пропорциональна этой разности температур. С внешней средой контактирует трансформаторное масло. Запишем уравнение для третьей компоненты  $x_3(t)$  с учетом поступления тепла от  $x_1(t), x_2(t)$ :

$$\frac{d(x_3(t) - T_{00})}{dt} = A_{33}(x_3(t) - T_{00}) + A_{31}x_1(t) + A_{32}x_2(t),$$

где  $A_{ij}$  ( $i, j = \overline{1, 3}$ ) – элементы матрицы  $A$ . Отсюда

$$\frac{dx_3(t)}{dt} = A_{33}x_3(t) + A_{31}x_1(t) + A_{32}x_2(t) - A_{33}T_{00}. \tag{2.2}$$

Полагая в (2.2)  $T_{00} = 20$ , получим графики (рис. 2.3), уходящие от 20 к 50.

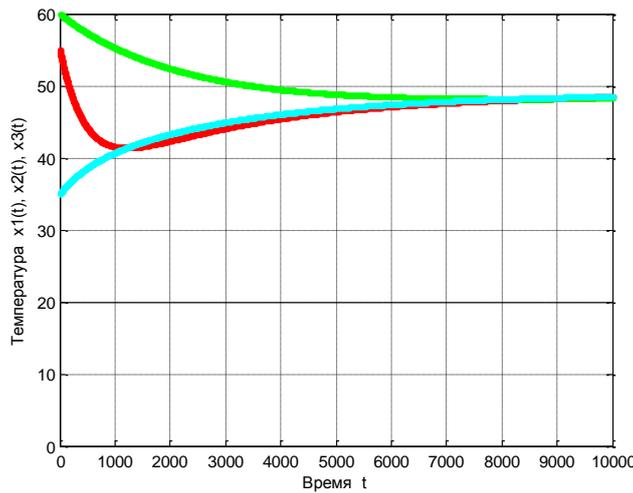


Рисунок 2.3 –  $T_{00} = 20$ ;  $t_k = 10000$

Предположим, что в (2.2) взаимодействие масла с внешней средой происходит не с коэффициентом  $A_{33}$ , а с другим коэффициентом. Запишем

$$\frac{dx_3(t)}{dt} = A_{33}x_3(t) + A_{31}x_1(t) + A_{32}x_2(t) - CA_{33}T_{00}. \tag{2.3}$$

Выберем в (2.3) коэффициент  $C = 0.39$ , получим графики (рис. 2.4).

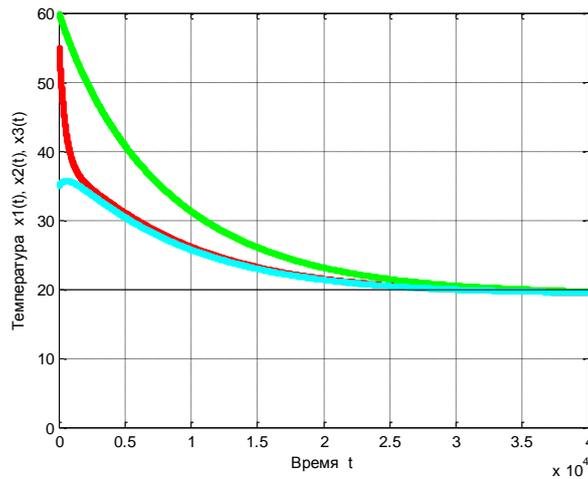


Рисунок 2.4 –  $T_{00} = 20$ ;  $t_k = 40000$ ;  $C = 0.39$

Проверим расчеты при другой температуре,  $T_{00} = 10$  (и др.) (рис. 2.5) и для  $T_{00}=3; 5; 10; 20$ . На интервале  $(0; 40000)$  для всех расчетных по модели (2.2) компонент  $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$  выполняются неравенства  $x_3(t_i) < x_1(t_i) < x_2(t_i)$ ,  $i = 1, \dots, n_0 + 1$ .

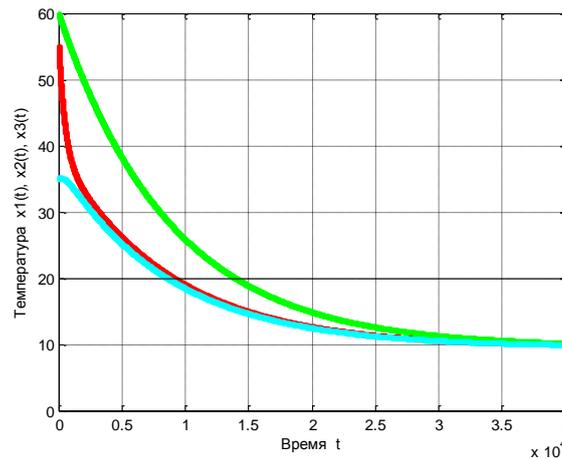


Рисунок 2.5 –  $T_{00} = 10$ ;  $t_k = 40000$ ;  $C = 0.39$

### 3. Расчеты в задаче оптимального управления

Пусть в (1.1), (1.2)  $T_{00} = 0$ ;  $f(t) \equiv 0$ ;  $g(t) \equiv 0$ :

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t), \quad x(0) = x_0, \quad t \in [0; t_k], \quad (3.1)$$

$$J = \gamma_1 \int_0^{t_k} (x(t))^T Q(x(t)) dt + \gamma_2 (x(t_k))^T F(x(t_k)) + \beta \int_0^{t_k} p^2(t) dt. \quad (3.2)$$

Записанный в виде (3.2) критерий качества управления означает, что минимизируется отклонение всех компонент  $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$  от нуля.

Управляющая функция  $u(t)$  охлаждает масло, поэтому возьмем вектор  $B$  в виде  $B = [0; 0; 1]^T$ . Система (3.1) вполне управляема, ранги матрицы  $A$  и матрицы Калмана  $AK = \begin{pmatrix} B & AB & A^2B \end{pmatrix}$  совпадают, равны 3. Оптимальное управление (1.4) имеет вид

$$u^0(t) = -\frac{B^T}{\beta} K(t)x(t), \quad (3.3)$$

где  $K(t)$  – матрица вспомогательных функций Риккати.

Получили графики (рис. 3.1, 3.2) и табл. 3.1.

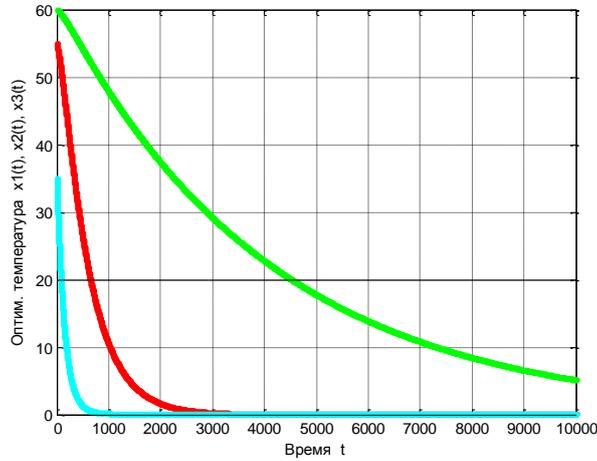


Рисунок 3.1 – Оптимальная температура,  $T_{00} = 0$ ;  $t_k = 10000$ ;  $\beta = 10^4$

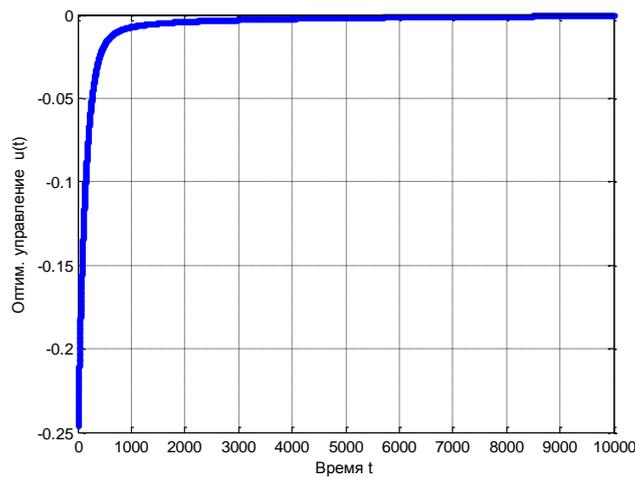


Рисунок 3.2 – Оптимальное управление  $u^0(t)$ ,  $T_{00} = 0$ ;  $t_k = 10000$ ;  $\beta = 10^4$

Таблица 3.1

Остывание по модели (3.1) с управлением, минимизирующим критерий (3.2)

Обмотки	Магнитопровод	Масло	Величина управления в модели (3.1)
55.0000	60.0000	35.0000	-0.2457
12.3595	48.9445	0.2262	-0.0079
2.3075	39.0899	0.0635	-0.0043
0.4522	31.2111	0.0366	-0.0031
0.1059	24.9189	0.0266	-0.0024
0.0378	19.8951	0.0208	-0.0019
0.0216	15.8840	0.0166	-0.0016
0.0158	12.6816	0.0133	-0.0012
0.0124	10.1249	0.0107	-0.0010
0.0100	8.0837	0.0088	-0.0008
0.0083	6.4540	0.0077	-0.0006
0.0215	5.1554	0.0736	-0.0000

Сравнение рис. 2.2, 3.1, табл. 2.1, 3.1 показывает значительное влияние управления (3.3)  $u^0(t)$  на процесс охлаждения (3.1). Рис. 3.2 показывает скачок величины управления в начальной точке  $t = 0$ .

#### 4. Расчеты в задаче стабилизации

В задаче оптимальной стабилизации в критерии качества (1.2)  $t_k = \infty$ . Расчеты показывают, что вспомогательные функции  $K_{ij}(t)$  матрицы Риккати  $K(t)$  имеют визуальные интервалы стационарности (рис. 4.1). Известно, что Р. Калман предложил в алгоритме управления (3.3) использовать стационарные величины  $\bar{K}_{ij}$  компонент матрицы  $K(t)$ . Стабилизирующее управление имеет вид

$$\bar{u}(t) = -\frac{B^T}{\beta} \bar{K}x(t); \quad \bar{u}(t) = -0.0001x_1(t) - 0.0001x_2(t) - 0.0019x_3(t). \quad (4.1)$$

Графики модели (3.1) при управлении (4.1) приведены на рис. 4.2, 4.3;  $\beta = 10^5$ .

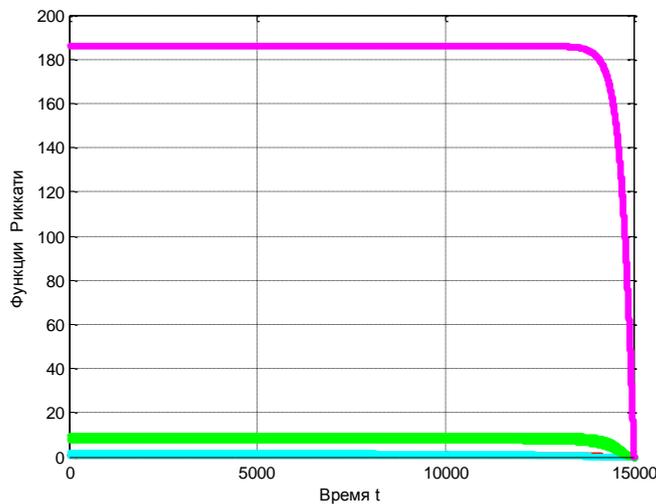


Рисунок 4.1 – Компоненты матричной функции Риккати  $K(t)$

В [5, 6] доказано, что визуальная стационарность вспомогательных функций  $K_{ij}(t)$  иллюстрирует их приближение к горизонтальным асимптотам  $\bar{K}_{ij}$ .

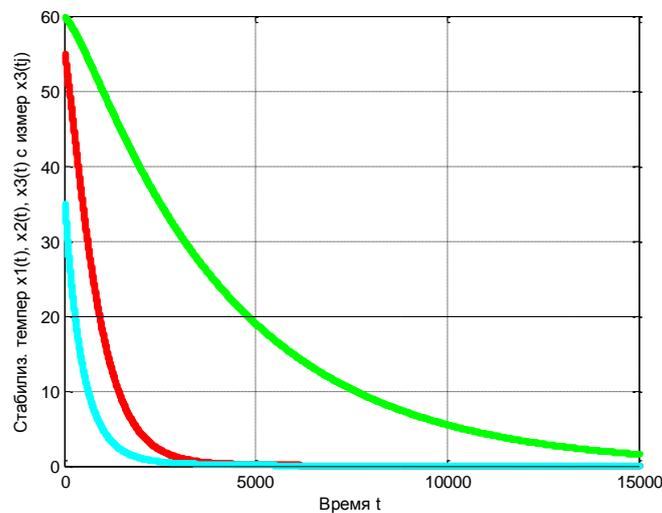


Рисунок 4.2 – Стабилизация без промежуточных измерений  $x_3(t)$

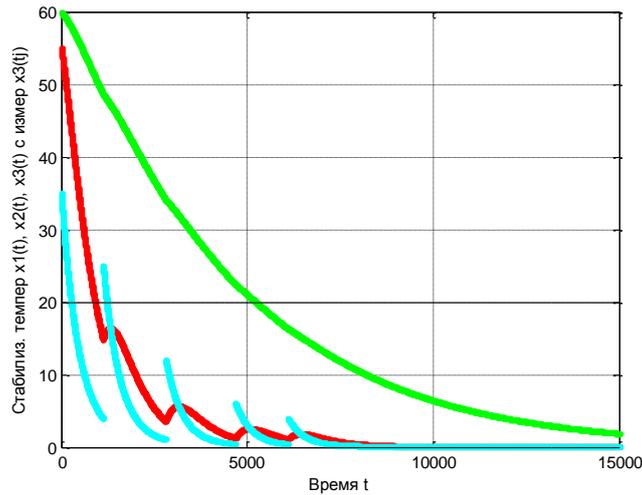


Рисунок 4.3. – Стабилизация с промежуточными измерениями  $x_3(t)$

Рис. 4.2, 4.3 показывают отличия в расчетах. В рассмотренном примере величины измерений  $x_3(t)$  взяты больше соответствующих расчетных величин, то есть масло остывает реально медленнее, чем в расчетах, и все компоненты  $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$  на рис. 4.3 остывают медленнее, чем на рис. 4.2.

Влияние измерения на стабилизирующее управление (4.1) отражено на рис. 4.4.

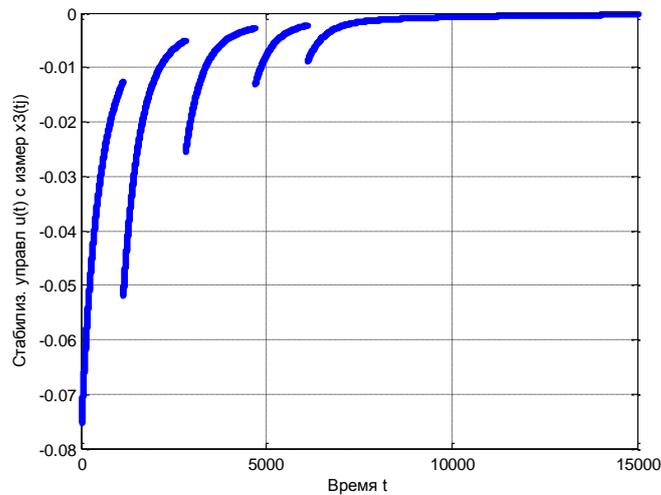


Рисунок 4.4 – Управление  $\bar{u}(t)$  с промежуточными измерениями  $x_3(t)$

### 5. Влияние коэффициента первого уравнения модели (2.1)

Данные в п. 2 коэффициенты  $A_{11} = -0.0019$ ;  $A_{13} = -A_{11}$  приводят к графикам на рис. 2.2. Рассмотрим способ построения модели вида (2.1), в которой уменьшена скорость охлаждения  $x_1(t)$  (обмотки).

Первое уравнение модели (2.1) в соответствии с матрицей  $A$  запишем в виде

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = A_{11}(x_1(t) - x_3(t)), \quad A_{13} = -A_{11}. \quad (5.1)$$

Выберем  $A_{11} = -0.0004$ , получим графики (рис. 5.1). Стабилизирующее управление равно

$$\bar{u}(t) = -\frac{B^T}{\beta} \bar{K}x(t); \quad \bar{u}(t) = -0.0002x_1(t) - 0.0001x_2(t) - 0.0018x_3(t). \quad (5.2)$$

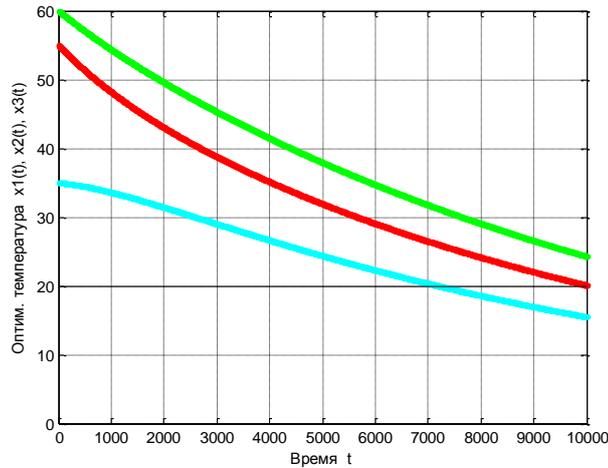


Рисунок 5.1 – Остывание по модели (2.1),  $T_{00} = 0$ ;  $A_{11} = -0.0004$

Сравнивая рисунки 5.1, 2.2 и алгоритмы управлений (5.2), (4.1), полагаем, что в модели (2.1) возможен более плавный расчетный режим изменения температуры компоненты  $x_1(t)$ . В реальности свойства  $x_1(t)$  и коэффициент  $A_{11}$  зависят от материалов, из которых изготавливаются обмотки.

**Заключение.** Численные расчеты показали особенности модели (2.1): очень малая величина определителя матрицы  $A$  и корней характеристических уравнений данной и замкнутой систем; очень большая величина выбираемого расчетного параметра  $\beta$ .

### Литература

1. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов: (пер. с венгерского Бики М.А. под ред. Тарле Г.Е.). – М.: Энергия, 1980.
2. Сатаркулов К.А., Калматов У.А., Суюнтбекова Н.А. Анализ процессов охлаждения силового трансформатора аналитическим и численным методами // Проблемы автоматизации и управления. – 2018. – № 2 (35). – С. 42–50.
3. Беллман Р. Динамическое программирование.–М.: Мир, 1965.
4. Егоров А.И. Основы теории управления. – М.: Наука, 2004. – 504 с.
5. Репин Ю.М., Третьяков В.Е. Решение задачи об аналитическом конструировании регуляторов на электронных моделирующих устройствах // Автоматика и телемеханика. –1963. –Т. 24. –№ 6. – С. 738–743.
6. Самохвалова Т.П. Асимптоты в линейных ССП и СРП с управлением по границе // Проблемы автоматизации и управления. –2013. – № 2 (25). – С. 19–27.

*А.М. Яблочников аспирант, art.kazspp@mail.ru*

*Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,  
Кыргызская Республика, Бишкек.*

## **ОБЗОР СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ГИДРОТУРБИН МИКРОГЭС**

Переход к нетрадиционным возобновляемым источникам энергии, в том числе микроГЭС. Однако, реализация такой концепции невозможно представить без новых технических и научных идей. Необходимы разработка простых технических решений и конструкций гидроагрегатов микроГЭС с целью стабилизации частоты их вращения и создания их математических (компьютерных) моделей.

Ключевые слова: микроГЭС; гидротурбина; частота вращения; способ регулирования; стабилизация

**Введение.** В настоящее время в мире отмечается тенденция перехода к нетрадиционным возобновляемым источникам энергии, в частности к микроГЭС. невозможен без новых технических и научных идей [1–7].

По территории Центральноазиатских Республик и Казахстана протекают десятки крупных и сотни малых рек и каналов, в которые вливаются тысячи высокогорных малых ручьев. Гидроэнергетический потенциал малых водотоков только КР оценивается в 1600 МВт. Поэтому для электроснабжения относительно небольших объектов, расположенных в труднодоступных отдаленных районах, где строительство централизованных линий электропередачи технически и экономически невыгодно, потенциальную гидроэнергию малых водотоков целесообразно использовать для создания малых и микро-гидроэлектростанций [6, 8].

Электроснабжение мелких рассредоточенных потребителей в настоящее время осуществляется с помощью дизельных и бензоэлектрических агрегатов. Эти агрегаты имеют существенные недостатки, к которым относятся использование дефицитного дизельного и особенно бензинового топлива и масла, загрязнение окружающей природной среды выхлопными газами и топливом, необходимость создания запасов топлива и высокая пожарная опасность, сложность доставки топлива на большие расстояния, необходимость постоянного обслуживания и высокий уровень шума. Замена таких агрегатов там, где это возможно, микроГЭС значительно улучшит электроснабжение, повысит эффективность множества мелких, удаленных автономных потребителей [9–11].

При разработке микроГЭС используются все известные типы гидротурбин: поворотно-лопастные, радиально-осевые, импульсные, осевые, турбины с горизонтальной и

наклонной осями вращения и т.д. [12, 13]. Известны исследования по разработке простых технических решений в конструкции гидроагрегатов с целью автоматической стабилизации частоты их вращения и, соответственно, по разработке их математических (компьютерных) моделей [14].

### Характеристики различных типов гидротурбин

Рассмотрим характеристики и принцип действия турбин разной конструкции, основываясь на данных И.А. Плотникова [11].

*Водяное колесо* (рис. 1): подливное (нижнебойное) колесо имеет к.п.д не более 35 %; к.п.д. среднебойного достигает 75 %; к.п.д. наливного (верхнебойного) – 85 %.

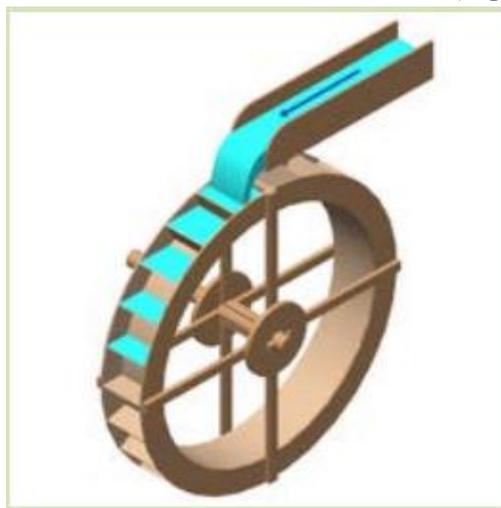


Рисунок 1 – Водяное колесо

*Турбина Пелтона* (рис. 2) относится к импульсному типу турбин, в которых потенциальная энергия напора воды на внешнем диаметре колеса при атмосферном давлении преобразуется в кинетическую энергию. На практике эта турбина применяется при высоте напора воды более 40 м.

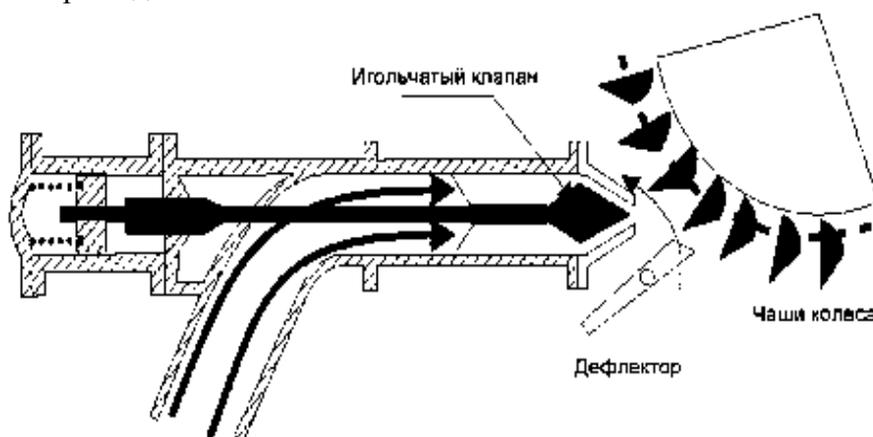


Рисунок 2 – Турбина Пелтона

*Турбина Тюрго* (рис. 3) – активная наклонно-струйная турбина (Turgo) используется при высоких напорах от 30 до 400 м.

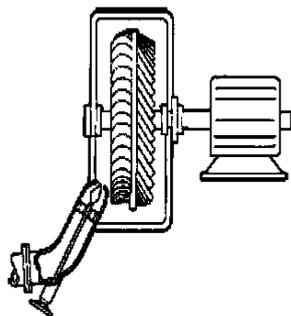


Рисунок 3 – Турбина Тюрго

*Турбина Банки* (рис. 4) – активная турбина поперечно-струйного течения, в ней дважды происходит преобразование энергии – в начале, во время «попадания» воды на лопасти на входе, затем – на выходе из полого ротора. Такой процесс не дает преимущества, если не считать того, что он обеспечивает довольно эффективный и простой способ отвода воды из ротора. Как правило, эта турбина используется при напорах от 2 до 100 м.

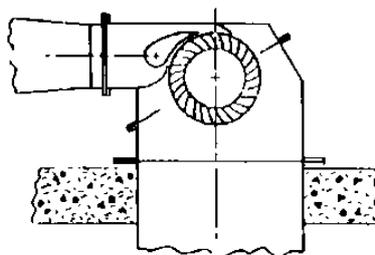


Рисунок 4 – Турбина Банки

*Турбина Каплана* (рис. 5) – реактивная пропеллерная (осевая), высокоскоростная. В процессе ее работы вода сначала попадает на направляющие лопасти, а затем течет вдоль оси винта.

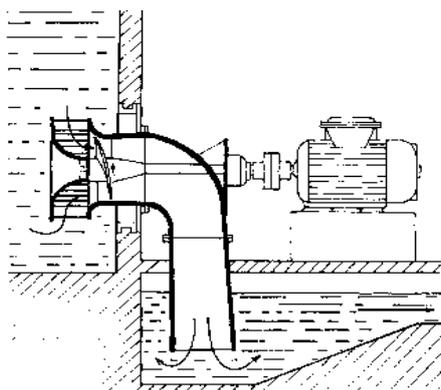


Рисунок 5 – Турбина Каплана

В турбине Каплана скорость вращения винта вдвое больше скорости потока воды, позволяет регулировать производительность за счет изменения открытия направляющего аппарата и поворота лопастей винта. Применяется при напорах воды от 1 до 30 м.

Турбина Френсиса (рис. 6) относится к реактивно-радиально-осевым. В турбине имеется кольцевой канал, окружающий рабочее колесо турбины. Вода течет радиально по этому каналу между неподвижными лопастями, направляющими поток воды, при этом лопасти рабочего колеса турбины имеют искривления, на которые попадает вода. Конструкция направляющей лопасти такова, что энергия потока воды наилучшим образом преобразуется во вращательное движение рабочего колеса. Способ регулирования производительности турбины аналогичен таковому в турбине Каплана и осуществляется за счет изменения угла атаки направляющих лопастей. Применяется при относительно больших напорах воды 30 ÷ 250 м.

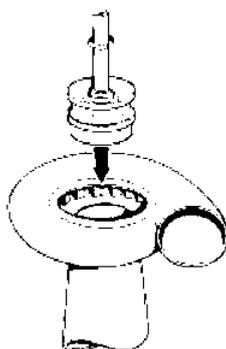


Рисунок 6 – Турбина Френсиса

Каждый тип гидротурбин соответствует определенному диапазону напора и расхода воды и имеет свою преимущественную область применения [11, 15], что показано на рис. 7.

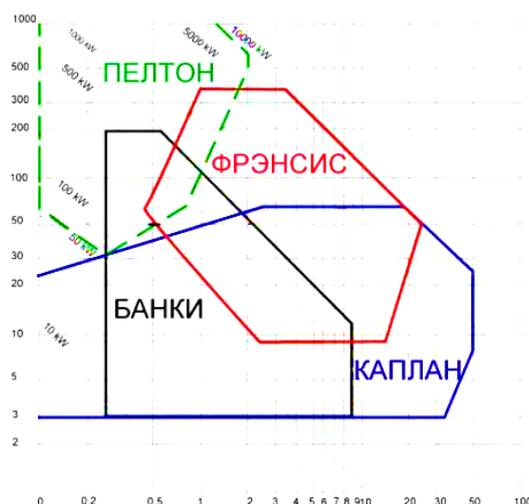


Рисунок 7 – Диаграмма соответствия диапазона напора и расхода воды и преимущественные области применения гидротурбин

Объем воды, необходимый для работы микроГЭС, при постоянной величине расчетной мощности и постоянных электромагнитных нагрузках определяется частотой вращения турбины. Поэтому быстроходные гидротурбины способствуют использова-

нию генераторов с хорошими массогабаритными показателями, а следовательно, и низкой стоимостью.

Для микроГЭС с малой скоростью вращения гидротурбины (менее 400 об/мин) рекомендуется применять мультипликаторы, что позволяет добиться уменьшения массы установки и повышения к.п.д. преобразования.

Для низконапорных микроГЭС наибольшее распространение получили реактивные гидротурбины пропеллерного типа с номинальной частотой вращения от 1000 до 3000 об/мин, что позволяет исключить мультипликатор из состава гидроэнергостановки.

На рис. 8 представлены экспериментальные характеристики нерегулируемой гидротурбины пропеллерного типа К-245 диаметром 289 мм при напоре  $H = 9$  м для двух положений открытия направляющего аппарата [10]. Из этих графиков видно, что частота вращения гидроагрегата может существенно изменяться в зависимости от колебаний величины нагрузки и энергии рабочего потока воды. Поэтому особое внимание при создании микроГЭС необходимо обращать на системы регулирования (стабилизации) ее рабочих режимов.

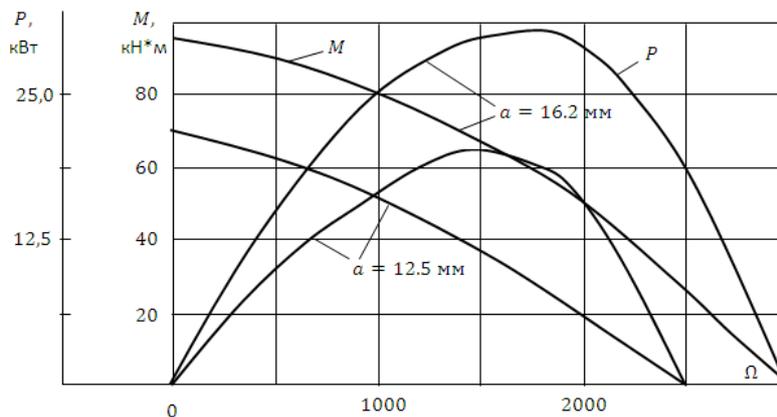


Рисунок 8 – Характеристики гидротурбины типа К-245,  $D = 289$  мм,  $H = 9$  м

### Способы регулирования частоты вращения гидротурбин микроГЭС

Ниже рассмотрены используемые способы регулирования частоты вращения гидротурбин микроГЭС [11, 13]:

1. Система с регулированием частоты вращения гидротурбин (рис. 9).

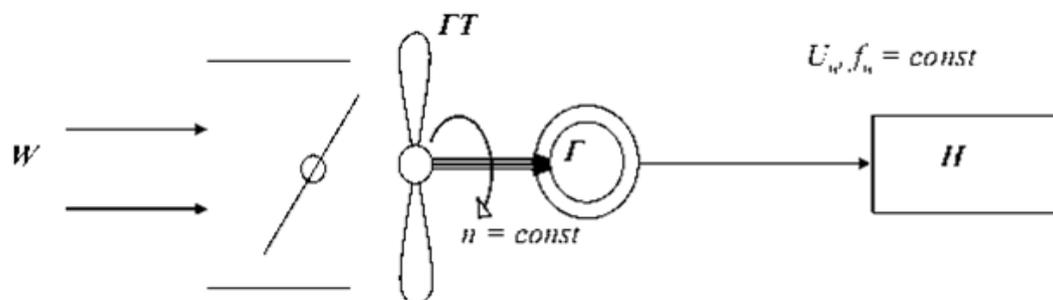


Рисунок 9 – Регулирование частоты вращения гидротурбины путем изменения угла поворота рабочих лопастей или изменением расхода воды

Регулирование частоты вращения турбины осуществляется изменением угла поворота рабочих лопастей или изменением расхода воды. При этом происходит выравнивание мощности, развиваемой турбиной, и мощности нагрузки.

Недостатком регулируемых турбин является усложнение конструкции и необходимость в электромеханической системе управления частотой вращения; большая инерционность регулирования, из-за которой частота вращения в переходных режимах значительно отклоняется от номинальной.

2. Система с приводом постоянной скорости (ППС) (рис. 10).

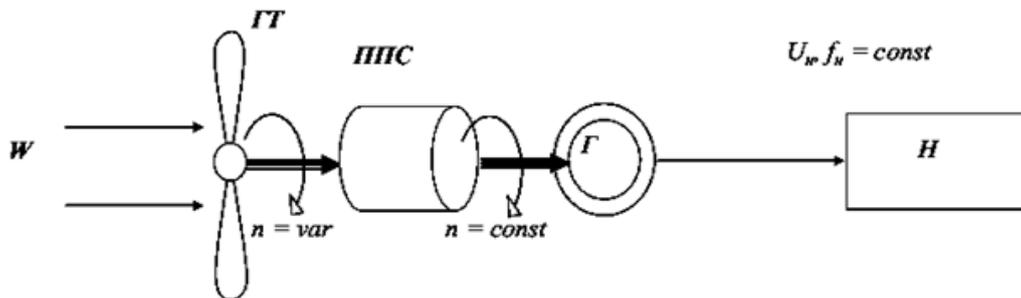


Рисунок 10 – Постоянство частоты вращения обеспечивается за счет ППС с аккумулятированием механической энергии

Приводы постоянной скорости (ППС) обеспечивают стабильность частоты вращения выходного вала при изменяющейся (в определенных пределах) частоте вращения приводной турбины.

В электроустановках, использующих ВИЭ, обычно применяют ППС с аккумулятированием механической энергии. В микроГЭС подобные системы могут применяться при малых кинетических энергиях потока. Недостатками являются низкий КПД, большая инерционность.

3. Системы с преобразователями частоты (ПЧ) (рис. 11).

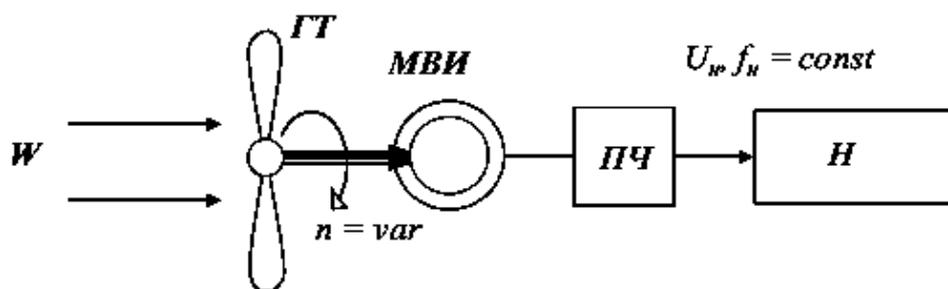


Рисунок 11 — Стабилизация частоты генерируемого напряжения за счет вспомогательного источника питания с ПЧ

Машинно-вентильные источники (МВИ) электропитания позволяют стабилизировать частоту генерируемого переменного тока при изменяющейся в широком диапазоне частоте вращения гидротурбины.

Достоинствами являются высокое качество выходного напряжения, независимость электрических параметров источника от режима работы турбины и параметров нагрузки.

Недостатки заключаются в сложности преобразовательной части и высокой стоимости, кроме того, требуются специальные генераторы, способные работать в широком диапазоне частот вращения, возможно возникновение гидравлического удара.

4. Структурная схема стабилизации параметров микро ГЭС автобалластного типа (рис. 12).

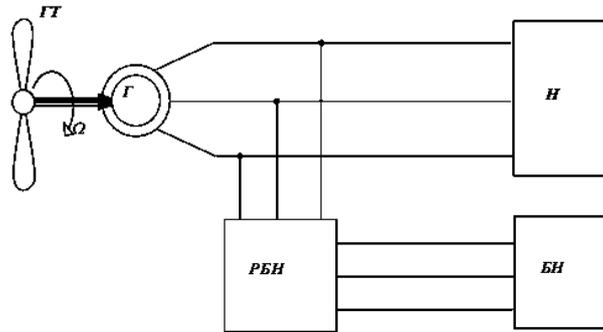


Рисунок 12 – Стабилизация частоты вращения на основе принципа автобалластного регулирования

Достоинства этого типа гидротурбин – стабилизация частоты вращения гидроагрегата при полном исключении из системы стабилизации электромеханических устройств, высокое быстродействие, возможность использования общепромышленных генераторов без запаса механической прочности, а также возможности использования насосов в турбинном режиме синхронных и асинхронных машин.

5. МикроГЭС автобалластного типа на базе двух генераторов. На рис. 13 приведена структурная схема микроГЭС с регулированием тормозного момента.

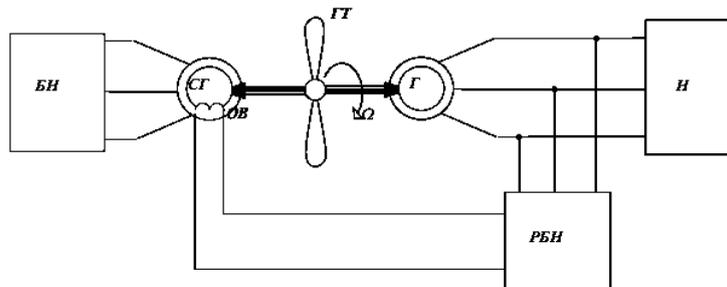


Рисунок 13 – Стабилизация частоты вращения с помощью регулирования тормозного момента: СГ – синхронный генератор; ОВ – обмотка возбуждения СГ

Достоинствами этого способа являются простота, небольшая мощность цепей управления, высокое быстродействие, отсутствие влияния регулирующих элементов на цепь нагрузки.

Недостаток заключается в использовании двух электрических машин соизмеримой мощности, в необходимости дополнительного регулятора напряжения основного генератора и в невозможности компенсации возникающей несимметрии нагрузки.

6. Структурная схема микроГЭС с дискретным балластом приведена на рис. 14.

Достоинством микроГЭС этого типа является отсутствие искажений формы напряжения генератора при естественной коммутации вентилей регулятора.

Недостатки: необходимость использования большого числа управляемых вентилей (сложность, дороговизна), кроме того, для стабилизации требуется большое количество дозированных ступеней балластной нагрузки.

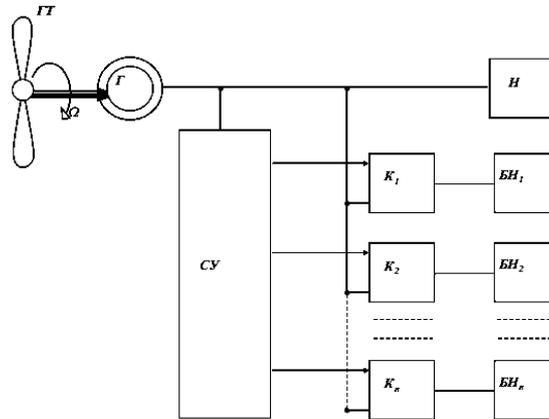


Рисунок 14 – Стабилизация частоты вращения турбины регулированием нагрузки.  
 ГТ – гидротурбина; Г – генератор; Н – полезная нагрузка; БН – балластная нагрузка;  
 РБН – регулятор балластной нагрузки

7. МикроГЭС с фазовым управлением, схема которой приведенная на рис. 18, имеет следующие достоинства: относительно простые электрические схемы, плавность регулирования.

К недостаткам следует отнести нелинейные искажения формы кривых фазных токов и напряжений генератора.

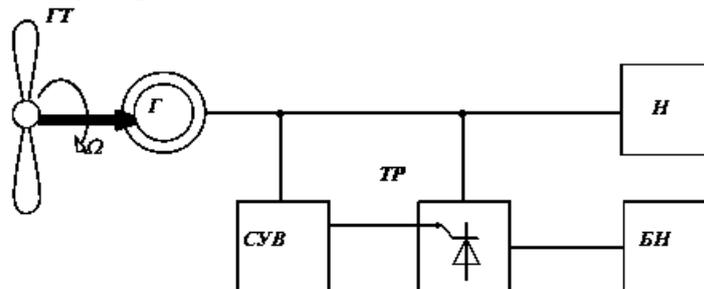


Рисунок 18 – Стабилизация частоты вращения за счет фазового управления:  
 СУВ – система управления вентилями; ТР – тиристорный регулятор

### Заключение

Анализ существующего оборудования для малой гидроэнергетики показал, что выпускаемые промышленностью гидроэнергетические установки не всегда подходят для использования в мобильных микроГЭС малой мощности. Поэтому требуется разработка новых решений конструкций гидроагрегатов для мобильных микроГЭС малой мощности.

*Литература*

1. Кушнир В.Г., Кошкин И.В., Глушко Д.В. Обоснование установки миниГЭС для электроснабжения системы освещения моста // Электротехнические и информационные комплексы и системы. –2018. –№ 1. Т. 14. – С. 13–18.
2. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. – Томск, 2001. – 104 с.
3. Ушаков В.Я. Современная и перспективная энергетика. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 468 с.
4. Чугаев Р.Р. Гидротехнические сооружения. – М.: Высшая школа, 1978. –352 с
5. Кривченко Г.И. Гидравлические машины. – М.: Энергия, –1978. 320 с.
6. Перспективы развития возобновляемых источников энергии в России. Под ред. В. Г. Николаева. – М.: Атмограф, 2009. – 456 с.
7. Кашарин Д.В., Годин М.А. Область применения и обоснование параметров мобильных микроГЭС рукавного типа для малых водотоков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура – 2010.– № 20.– С. 142–148.
8. Каргиев В. М. Энергия будущего – возобновляемая энергия. Стратегия Европейского союза в области возобновляемых источников энергии // Возобновляемая энергия. – 2008. – № 3. – С. 2–3.
9. Обухов С.Г. Микрогидроэлектростанции: курс лекций // ГОУ ВПО ТПУ. – Томск: ТПУ, 2009. – 63 с.
10. Липкин В. И., Богомбаев Э. С. Микрогидроэлектростанции: Пособие по практическому применению. – Бишкек, 2007. – 30 с.
11. Плотников И.А. Микрогидроэнергетика. – Томск, –2014. Интернет адрес: <http://portal.tpu.ru>. (дата обращения 02.04.19).
12. Безруких П.П., Соловьев Д.А. Взгляд на энергетiku 2020 года в свете устойчивого развития России // Малая энергетика. – 2014. – № 1–2. –С. 17.
13. Кажинский Б.Б., Гидроэлектрические и ветроэлектрические станции малой мощности. – М.: Госпланиздат, 1946. – 135 с.
14. Ниязова Г.Н., Сатаркулов К., Кыдырмаева З.С. и др. Разработка компьютерной модели системы стабилизации и управления частотой вращения микроГЭС нового типа // Проблемы автоматизации и управления. – 2017. – № 2 (33). – С.43–51.
15. Ниязова Г.Н., Анализ существующих способов стабилизации параметров микроГЭС // Проблемы автоматизации и управления. – 2018. – № 1 (34). – С. 12–18.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ОБЪЕКТОВ

---

УДК 621.316.72

<https://doi.org/10.5281/zenodo.3252989>

*А.Б. Бакасова, Г.Н. Ниязова, Т.К. Сатаркулов*

*Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР, Бишкек*

*Ч. М. Бузурманкулова, Ч.К. Дюшеева*

*Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,  
Бишкек*

### ПРИМЕНЕНИЕ СРЕД MATLAB И LABVIEW ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ГИДРОАГРЕГАТА НОВОГО ТИПА

Для компьютерного моделирования работы микроГЭС нового типа использована возможность взаимодействия пакетов LabVIEW и MatLAB. Система дифференциальных уравнений, представляющая математическую модель микроГЭС, решена численным методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Результаты моделирования показали высокую эффективность предложенного способа стабилизации вращения гидротурбины, а также стабилизации частоты напряжения электрической энергии, вырабатываемой микроГЭС.

*Ключевые слова:* микроГЭС; маховик; моделирование; стабилизация частоты вращения; гидротурбина; регулятор Уатта; MatLAB; LabVIEW.

#### **Введение**

Микроэнергетика – перспективное направление, исследующее новые научные и технические идеи [1–4]. МикроГЭС с гидроагрегатами мощностью до 50 кВт используются для энергоснабжения удаленных автономных потребителей. Надежная работа микроГЭС возможна только при стабильной частоте гидроагрегата. Достижение стабильности частоты вращения турбины автономной микроГЭС является важной научной задачей.

**Постановка задачи.** В работе предложена динамическая модель поведения микроГЭС малой мощности с новым способом стабилизации частоты вращения гидротурбины [5, 6, 7]. Стабилизация частоты основана на использовании маховика с автоматически регулируемой массой, моментом инерции (АРМИ) и потоком воды, который подается на вход гидротурбины. Целью исследования является проведение компьютерного моделирования динамической модели микроГЭС [8-9] с использованием возможностей взаимодействия пакетов LabVIEW и MatLAB для изучения влияния различных параметров микроГЭС на режим её работы.

**Описание принципа стабилизации скорости вращения гидротурбины.**

Упрощенная функциональная схема предлагаемой микроГЭС малой мощности представлена на рис. 1. Это устройство представляет собой генератор с постоянными магнитами, приводимый во вращательное движение гидротурбиной с центробежным регулятором.

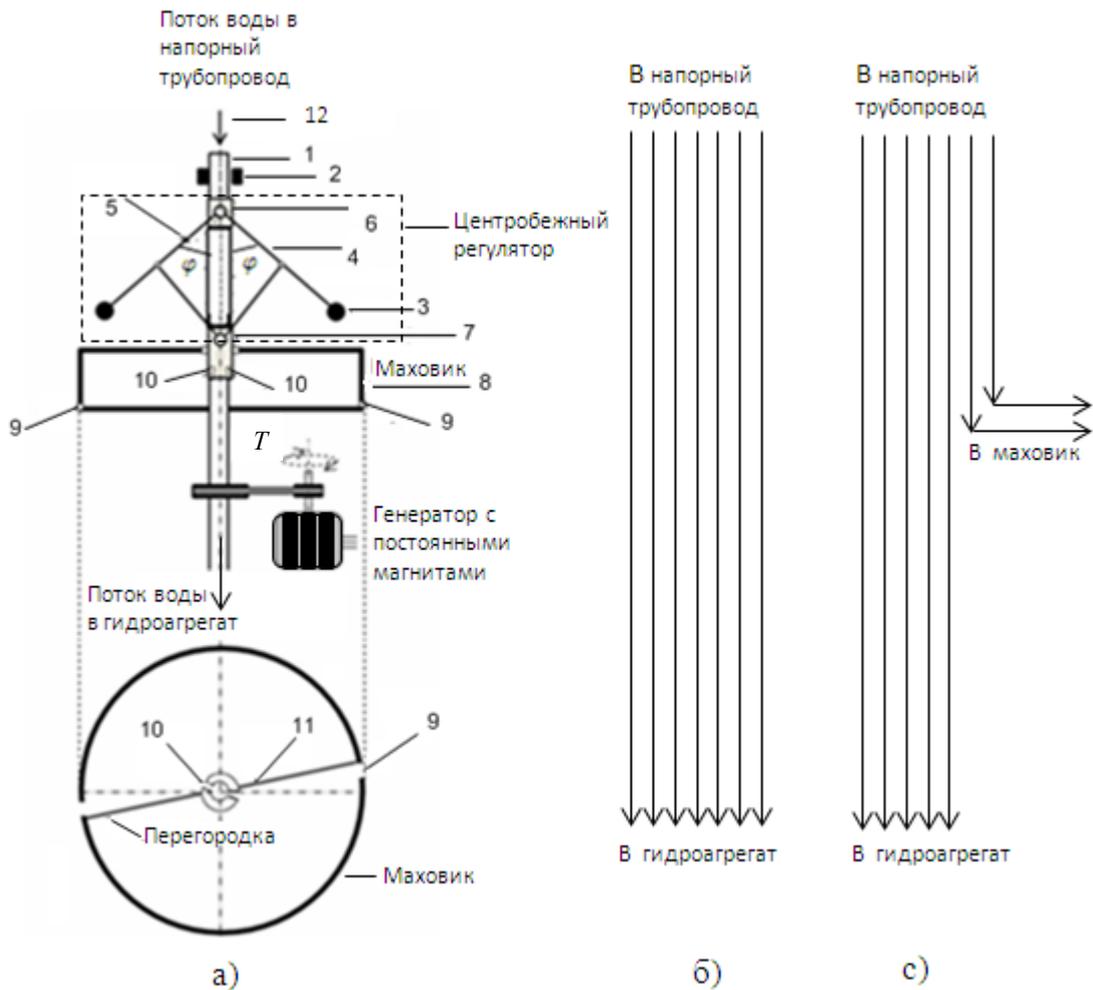


Рисунок 1 – Упрощённые схемы: а) – микроГЭС с центробежным регулятором и с АРМИ маховиком; б, с) – схематичное представление потока воды в напорном трубопроводе до входа в гидроагрегат соответственно при закрытом отверстии 10 муфтой 7 и его открытом состоянии.

Устройство содержит: напорный трубопровод 1, который одновременно используется в качестве вертикального вала гидротурбины и вала гидротурбины вала центробежного регулятора, полый маховик 8, полость которого разделена перегородкой 11 на два участка. На цилиндрической поверхности полого маховика просверлены сквозные отверстия 9 для выброса воды, на участке вала, находящегося внутри полого маховика, просверлены сквозные отверстия 10 для поступления воды в полость маховика. При номинальной частоте вращения гидротурбины отверстия 10 закрыты муфтой 7.

Центробежный регулятор (ЦР) представляет собой могущий вращаться вокруг

своей вертикальной оси вал  $T$ , в верхнем конце которого на шарнирах прикреплены к неподвижной втулке 6 два одинаковых стержня 4 и 5 с одинаковыми грузами на концах. Стержни 4 и 5 скреплены дополнительными шарнирами, поэтому отклоняться от своего вертикального положения они могут лишь одновременно на один и тот же угол  $\varphi$ , находясь в одной и той же вертикальной плоскости. Когда стержни 4 и 5 отклоняются от своего вертикального положения на угол  $\varphi$ , они при помощи шарниров приводят в движение специальную муфту 7, надетую на вал  $T$ , т.е. расстояние этой муфты до неподвижной втулки 6 пропорционально  $\cos \varphi$  [10]. Длину вертикальных стержней 4 и 5 примем за  $l$  единиц, а масса каждого из грузов, прикрепленных на их концах, равна  $m$ . Пусть при вращении вала  $T$  с угловой скоростью  $\omega$  стержни 4 и 5 отклонились от вертикального положения на угол  $\varphi$ , при этом на каждый из грузов действует центробежная сила, равная  $F_2 = m\omega^2 \sin \varphi$ . Одновременно на каждый груз действует сила тяжести, равная  $F_3 = mg$  (рис.2).

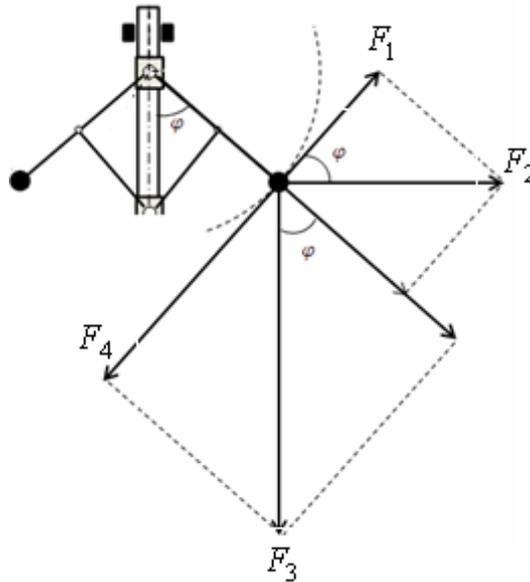


Рисунок 2 – Силы, действующие на грузы при вращении ЦР, и их составляющие

Учитывая, что в направлении стержней 4 и 5 силы, действующие на груз, уравновешиваются реакцией этих стержней, для расчёта силы, действующей на груз, следует разложить обе упомянутые силы по осям, первая из которых направлена вдоль стержня, а вторая – в перпендикулярном к нему направлении, в сторону возрастания угла  $\varphi$ . Из рис. 2 видно, что составляющая центробежной силы в направлении возрастания угла  $\varphi$  равна  $F_1 = m\omega^2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi$ , а составляющая силы тяжести в том же направлении  $F_4 = -(mg/l) \cdot \sin \varphi$ . Таким образом, равнодействующая обеих сил определяется выражением

$$F_{pd} = m\omega^2 \sin \varphi \cdot \cos \varphi - \frac{mg}{l} \cdot \sin \varphi. \quad (1)$$

**Статическое рассмотрение регулятора.** Заметим, что при заданной угловой скорости  $\omega$  стержни 4 и 5 отклоняются под действием сил  $F_2$  и  $F_3$  на угол  $\varphi$ , значение которого определяется из равенства [10]

$$m\omega^2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi - \frac{mg}{l} \sin \varphi = 0, \quad (2)$$

т.е. путем приравнивания силы  $F_{pd}$  к 0. Угол  $\varphi$ , определенный из соотношения (2), является однозначной монотонно возрастающей функцией скорости  $\omega$ ; в этом смысле регулятор Уатта может рассматриваться как измеритель скорости вращения [10].

**Уравнение динамики регулятора.** Движение массы  $m$ , находящейся под воздействием силы (1), описывается дифференциальным уравнением. Кроме силы (1) на массу  $m$  действует сила трения в сочленениях шарниров, которая возникает при её движении. Предположим, что сила трения  $f_{mp}$  пропорциональна скорости движения массы  $m$  и имеет знак, противоположный знаку этой скорости, т.е.

$$f_{mp} = -b \frac{d\varphi}{d\tau},$$

где  $b$  – коэффициент пропорциональности, *const.* Таким образом, принимая  $\varphi$  за координату, определяющую положение массы, мы получим для  $\varphi$  дифференциальное уравнение [10]:

$$m \frac{d^2 \varphi}{d\tau^2} = m\omega^2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi - \frac{mg}{l} \cdot \sin \varphi - \frac{b}{l} \cdot \frac{d\varphi}{d\tau}. \quad (3)$$

**Уравнение динамики механической части микроГЭС.** Механическая часть микроГЭС представляет собой гидротурбину, на вал которой насажен полый маховик  $M$  с моментом инерции  $J_m$ . При номинальной скорости вращения гидротурбины полость маховика не заполнена водой. Гидротурбина приводится во вращательное движение силой реактивной отдачи напора воды в гидротурбине и способна совершать полезную работу, вращая с помощью ременной передачи ротор генератора. Дифференциальное уравнение системы «гидротурбина-генератор» [5, 6]:

$$(J_1 + J_m(\varphi)) \frac{d\omega}{d\tau} = M_m(\varphi) - M_z, \quad (4)$$

где  $J_1$  – момент инерции вращающихся частей, без учёта момента инерции маховика;  $J_m(\varphi)$  – момент инерции маховика, значение которой начинает увеличиваться с момента поступления воды в полость маховика;  $\omega$  – угловая скорость вращения гидроагрегата;  $M_m(\varphi)$  – механический момент гидротурбины, значение которого начинает убывать при  $\varphi > \varphi^*$ , где  $\varphi^*$  – некоторое «среднее» значение  $\varphi$  (рис. 2), вблизи которого должно поддерживаться значение регулируемой величины  $\varphi$ , а следовательно, и значение  $\omega$ ;  $M_z$  – момент сопротивления генератора.

Поддержание равномерного вращательного движения гидротурбины с помощью центробежного регулятора реализуется следующим образом.

При прохождении потока воды 12 (рис. 1) по напорному трубопроводу 1 и выходе напора 13 из гидротурбины, напорный трубопровод 1, а также жёстко соединённые с ним маховик 8 и неподвижная втулка 6 приводятся во вращательное движение. При вращении вала 1 на каждый из грузов 3 действует центробежная сила, под воздействием которой стержни 4 и 5, отклоняясь от своего вертикального положения на некоторый угол, при помощи шарниров приводят в движение муфту 7. При отклонении значения угловой скорости вращения вала от номинального (из-за изменения нагрузки генератора) происходит изменение центробежной силы, и подвижная втулка 7 приоткрывает или закрывает сквозные отверстия на внутренней образующей маховика, регулируя поступление воды в него.

Как было отмечено, при номинальной скорости вращения гидротурбины отверстия 10 закрыты муфтой 7 (рис.1,б).

При увеличении скорости вращения выше номинальной за счёт уменьшения нагрузки генератора муфта 7 приоткрывает отверстия 10 и поток воды поступает в полость маховика (рис. 1, с), увеличивая его массу и момент инерции, а также уменьшая напор потока воды 13 за счёт уменьшения давления в трубопроводе 1 (часть потока воды поступает в полость маховика и тем самым уменьшает напор воды в гидротурбине). Всё это приводит к понижению скорости вращения вала 1. Когда скорость вращения вала приближается к номинальной, муфта 7 начинает прикрывать сквозные отверстия 10, уменьшая поступление воды в него и увеличивая напор воды в гидротурбине. Накопившаяся в маховике вода выбрасывается через отверстия 9, обеспечивая поддержание равномерного вращательного движения гидротурбины микроГЭС.

Механический момент  $M_m(\varphi)$  и момент инерции  $J_m(\varphi)$  в выражении (4) можно представить в виде:

$$M_m(\varphi) = M_m + k_1(\cos \varphi - \cos \varphi^*), \quad (5)$$

$$J_m(\varphi) = J_m - k_2(\cos \varphi - \cos \varphi^*), \quad (6)$$

где  $M_m, J_m$  – соответственно составляющие момента  $M_m(\varphi)$  и момента инерции  $J_m(\varphi)$  при  $\varphi = \varphi^*$ , а  $k_1, k_2 > 0$  – постоянные коэффициенты пропорциональности.

Как видно из соотношений (3) – (6), система «генератор-регулятор» описывается дифференциальными уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} m \cdot (d^2\varphi/d\tau^2) &= m \cdot \omega^2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi - m \cdot \frac{g}{l} \cdot \sin \varphi - \frac{b}{l} \cdot (d\varphi/d\tau), \\ J(\varphi) \cdot (d\omega/d\tau) &= k_1 \cdot \cos \varphi - M \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

Где  $J(\varphi) = J_1 + J_m(\varphi) = J_1 + J_m - k_2 \cdot (\cos \varphi - \cos \varphi^*)$ ;

$M = (M_c - M_m + k_1 \cdot \cos \varphi^*)$  – величина, зависящая от нагрузки; угол  $\varphi^*$ , при котором  $d\omega/dt = 0$ , равен  $\arccos(M/k_1)$ .

Первое уравнение в системе (7) имеет второй порядок. Для приведения системы к нормальному виду введем новую переменную  $\psi$  :

$$\psi = \frac{d\varphi}{d\tau}.$$

Тогда система (7) запишется в нормальной форме:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\varphi}{d\tau} &= \psi, \\ \frac{d\psi}{d\tau} &= \omega^2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi - \frac{g}{l} \cdot \sin \varphi - \frac{b}{m \cdot l} \cdot \psi, \\ \frac{d\omega}{d\tau} &= \frac{k_1}{J(\varphi)} \cdot \cos \varphi - \frac{M}{J(\varphi)}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Для уменьшения числа независимых параметров сделаем замену переменных [11]

$$\varphi = x_1, \quad \psi = \left(\frac{g}{l}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot x_2, \quad \omega = \left(\frac{g}{l}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot x_3, \quad \tau = \left(\frac{l}{g}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot t. \quad (9)$$

В результате (8) перейдет в систему

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} &= (\sin x_1 \cdot \cos x_1) \cdot x_3^2 - \sin x_1 - \gamma \cdot x_2, \\ \frac{dx_3}{dt} &= \frac{1}{J(x_1)} \cdot K_1 \cdot (\cos x_1 - \rho) \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где

$$\gamma = \frac{b}{m(g \cdot l)^{\frac{1}{2}}}; \quad J(x_1) = J_1 + J_m - k_2 \cdot (\cos x_1 - \cos \varphi^*); \quad \rho = \frac{M}{k_1}; \quad (11)$$

$$K_1 = \frac{k_1 \cdot l}{g}. \quad (12)$$

Система уравнений (10) описывает динамику поведения микроГЭС с АРМИ маховиком.

Для компьютерного моделирования режимов работы предлагаемой микроГЭС и для сравнения с режимом работы микроГЭС при отсутствии АРМИ маховика необходима её математическая модель.

Такую математическую модель можно получить из системы уравнений (10), полагая  $J_m=0, k_2=0$  [11]:

$$\left. \begin{aligned} dx_1/dt &= x_2, \\ dx_2/dt &= (\sin x_1 \cdot \cos x_1) \cdot x_3^2 - \sin x_1 - \gamma \cdot x_2, \\ dx_3/dt &= K \cdot (\cos x_1 - \rho) \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

где

$$\gamma = b / \left( m \cdot (g \cdot l)^{\frac{1}{2}} \right), \quad \rho = M / k_1, \quad (14)$$

$$K = K_1 / J_1 = (k_1 \cdot l) / (J_1 \cdot g). \quad (15)$$

Учитывая, что параметры  $k_1, l, J_1, g$  у обеих микроГЭС равны, проведём следующие преобразования. Из выражения (15) определим  $k_1 \cdot l$  и подставим в выражение (12). В результате модель микроГЭС (10) примет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} dx_1/dt &= x_2, \\ dx_2/dt &= (\sin x_1 \cdot \cos x_1) \cdot x_3^2 - \sin x_1 - \gamma \cdot x_2, \\ dx_3/dt &= (K \cdot J_1) / \left( J_1 + J_m - k_2 \cdot (\cos x_1 - \cos \varphi^*) \right) \cdot (\cos x_1 - \rho) \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

где

$$\gamma = b / \left( m \cdot (g \cdot l)^{\frac{1}{2}} \right), \quad \rho = M / k_1. \quad (17)$$

Задавая числовые значения параметрам  $\gamma, K, J_1, \rho, J_m, k_2, \cos \varphi^*$  в выражениях (13) и (16), получим различные компьютерные модели микроГЭС и исследуем их поведение соответственно без АРМИ маховика и с АРМИ маховиком.

При численном решении систем уравнений (13) и (16) использованы математические возможности пакетов LabVIEW, MatLab и возможность их взаимодействия [12, 13].

**Результаты моделирования и заключение.** Блок-диаграмма виртуального прибора (ВП) для численного решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений (16), являющейся математической моделью микроГЭС с АРМИ маховиком, представлена на рис. 3. Блок-диаграмма ВП для микроГЭС без АРМИ маховика будет отличаться тем, что вызов солвера *ode45* будет осуществлен от функции *MikrGes*.

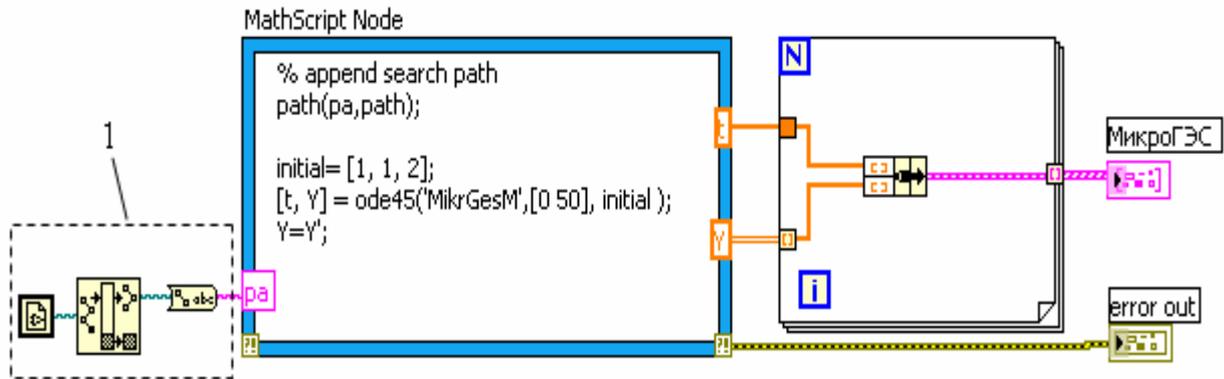


Рисунок 3 – Блок-диаграмма ВП: вызов солвера *ode45* от функции *MikrGesM*

Содержание *m*-файлов функций *MikrGesM* и *MikrGes* представлено в Таблице 1.

Таблица 1 – Содержание *m*-файлов

<i>m</i> – файл функции <i>MikrGesM</i> (16)	<i>m</i> – файл функции <i>MikrGes</i> (13)
<pre> % МикроГЭС с маховиком function dxdt = MikrGesM(t, x)     H=1.1;      % K     r=0.99;    % ρ     g=0.01;    % γ     J1=10;     % J<sub>1</sub>     kosfi=0.6; % cosφ*     k2=600;    % k<sub>2</sub>     Jm=20;     % J<sub>m</sub>     dxdt(1) = x(2);     dxdt(2) = (sin(x(1))*cos(x(1)))*x(3)^2-     sin(x(1))-g*x(2);     dxdt(3) = (H*J1)/(J1+(Jm-k2*(cos(x(1))-     kosfi)))*(cos(x(1))-r);     dxdt = dxdt';         </pre>	<pre> % МикроГЭС без маховика function dxdt = MikrGes(t, x)     H=1.1;      % K     r=0.99;    % ρ     g=0.01;    % γ     dxdt(1) = x(2);     dxdt(2) = (sin(x(1))*cos(x(1)))*x(3)^2-     sin(x(1))-g*x(2);     dxdt(3) = H*(cos(x(1))-r);     dxdt = dxdt';         </pre>

На рис. 3 функции LabVIEW, расположенные в блоке 1, определяют путь к *m*-файлу *MikrGesM* (микроГЭС с маховиком с параметрами  $H=0.1$ ;  $r = 0.01$ ;  $g = 0.01$ ;  $J_1=10$ ;  $kosfi=0.6$ ;  $k_2=100$ ;  $J_m=80$ ) и передают их содержание солверу *ode45*, расположенному в MathScript Node. Перед вызовом солвера формируется вектор *initial* начальных условий и массив из двух чисел  $[0 \ 50]$ , задающие промежуток для решения уравнения. Результаты численных решений выводятся в виде графиков на экран виртуального осциллографа (рис. 4). Для получения результатов, соответствующих микроГЭС без АРМИ маховика, солверу *ode45* передается содержание *m*-файла функции *MikrGes* при тех же значениях параметров моделирования. Результаты представлены на рис. 5.

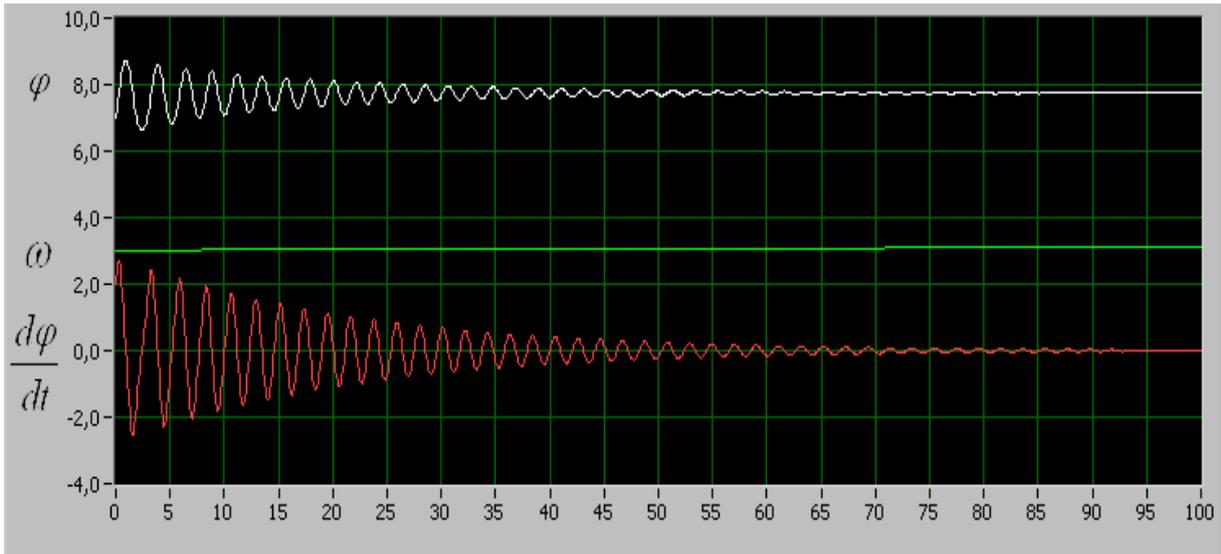


Рисунок 4 – МикроГЭС с АРМИ маховиком: зависимость от времени угловой скорости гидротурбины –  $\omega$ ; угла отклонения груза  $t$  от вертикального положения –  $\varphi$ ; скорости изменения значения этого угла

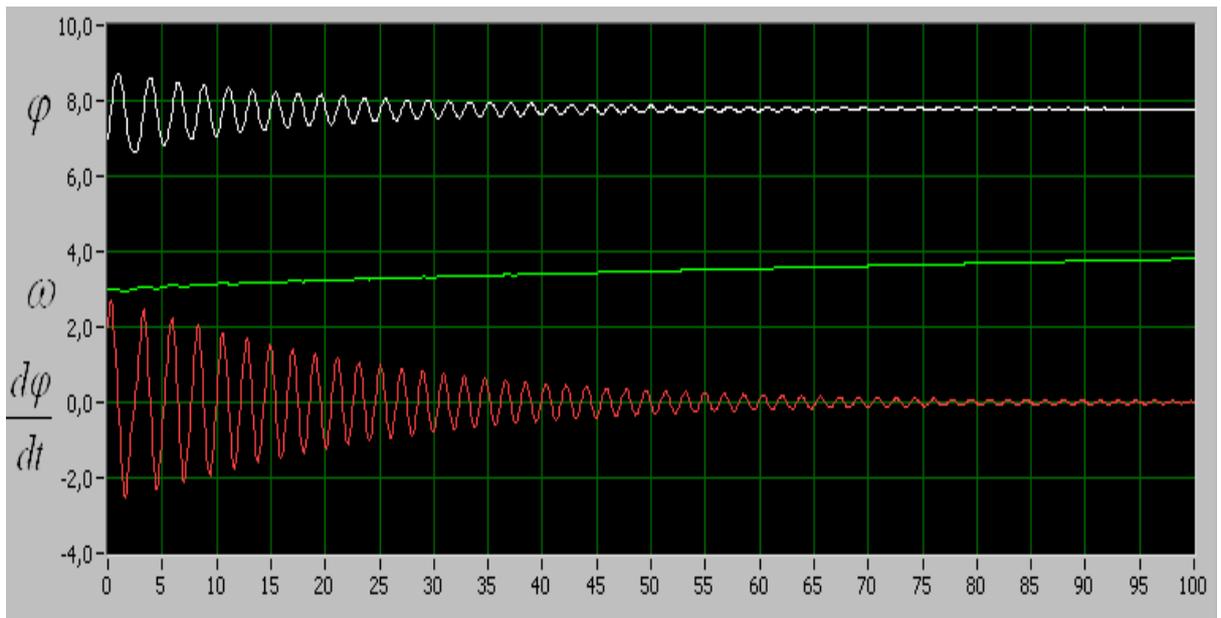


Рисунок 5 – МикроГЭС без АРМИ маховика: зависимость от времени угловой скорости гидротурбины –  $\omega$ ; угла отклонения груза  $t$  от вертикального положения –  $\varphi$ ; скорости изменения значения этого же угла

Сравнение графиков временных зависимостей угловых скоростей  $\omega$ , представленных на рисунках 4 и 5 для микроГЭС с АРМИ маховиком и без него соответственно, показывает высокую эффективность действия маховика на стабилизацию скорости для гидротурбины с АРМИ маховиком. Так, например, на стабилизацию угловой скорости для микроГЭС с АРМИ маховиком затрачивается около 10 единиц времени моделирования (рис. 4), тогда как для микроГЭС без АРМИ маховика на стабилизацию скорости вращения требуется более 100 единиц времени моделирования.

**Литература**

1. Кушнир В.Г., Кошкин И.В., Глушко Д.В. Обоснование установки миниГЭС для электроснабжения системы освещения моста // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – № 1. – Т. 14. – С. 13–18.
2. Крылов А.П., Бакштанин А.М. Новые концепции в развитии микрогидроэнергетики. Гидравлика в напорных водоводах микро-ГЭС // Строительство и архитектура. – 2017. – № 5. – С. 8–14.
3. Спирин Е.А., Никитин А.А., Головин М.П., Карпенко В.В. О выборе типа микро-ГЭС и ее оптимальной мощности в зависимости от гидрологических параметров // Всероссийская конференция «Актуальные проблемы машиностроения», 2014. С. 543–547.
4. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. – Томск: СТУ, 2001. – 120 с.
5. Сатаркулов К., Бакасова А.Б., Иманакунуова Ж.С., Ниязова Г.Н. Способ стабилизации частоты автономной микроГЭС // Проблемы автоматизации и управления. – 2014. – № 1 (26). – С. 20–23.
6. Ниязова Г.Н., Сатаркулов К., Кыдырмаева З.С., Яблочников А.М. Разработка компьютерной модели системы стабилизации и управления частотой вращения турбины микроГЭС нового типа // Проблемы автоматизации и управления. – 2017. – № 2 (33). – С. 43–51.
7. Ниязова Г.Н. Анализ существующих способов стабилизации параметров микроГЭС // Проблемы автоматизации и управления. – 2018. – №1(34). – С. 12–19 .
8. Сатаркулов К. А., Бакасова А. Б., Ниязова Г. Н., Сатаркулов Т. К. и др. «Устройство для поддержания равномерного вращательного движения турбины микроГЭС» // Патент Кыргызской Республики № 2113. 2018. 20170121.1. Бюл. № 12.
9. Бакасова А. Б., Сатаркулов К.А., Ниязова Г.Н., Яблочников А.М., Усубалиева Г.К. «Компьютерное моделирование микроГЭС малой мощности с маховиком, автоматически регулируемой моментом инерции». Информатика и системы управления. – Благовещенск (РФ). – 2019. – № 1 (59). – С. 36–45.
10. Понтрягин Л.С. Обыкновенные дифференциальные уравнения. 4-е изд., – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974. – 331 с., ил.
11. Хэссард Б., Казаринов Н., Вэн И. Теория и приложения бифуркации рождения цикла; пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 280 с., ил.
12. Суранов А.Я. LabVIEW 8.20: Справочник по функциям. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 536 с.
13. Трэвис Дж., Кринг Дж. LabView для всех. 4-е изд. – М.: Изд-во ДМК, 2011. – 904 с.

*С.М. Асанова, Арфан аль Хакам, Аскарбек улуу Нурлан, Э.Т. Актаев*  
*Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,*  
*Кыргызстан, г. Бишкек, a\_sm07@mail.ru*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ДРЕВОВИДНОЙ СТРУКТУРОЙ И РАЗНЫМИ НОМИНАЛЬНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ**

Предложен структурированный иерархически-многоуровневый подход к расчету потерь электроэнергии и режимов работы в разомкнутых электрических сетях с разными номинальными напряжениями при заданных напряжении источника питания и нагрузках. Предложенный подход основан на представлении исходного графа сети в виде иерархически-многоуровневой структуры, разбитой на две ступени с номинальными напряжениями  $U_{ном} \leq 35$  кВ и  $U_{ном} > 35$  кВ, и на использовании традиционного инженерного двухэтапного метода, где в определенной последовательности производится расчет по структуре сети снизу вверх (этап 1) и сверху вниз (этап 2).

**Ключевые слова:** распределительные электрические сети; потери электроэнергии; трансформатор; структурированный иерархически-многоуровневый подход; ориентированный граф; алгоритм.

**Введение.** В работах [1–4] структурированный иерархически-многоуровневый подход был применен для решения: задачи проектирования системы дистанционной диагностики обрыва проводов воздушных линий распределительных электрических сетей [1], поэлементного расчета нагрузочных потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях 6–20 кВ [2], эквивалентирования распределительных электрических сетей 6–20 кВ при оценке потерь электроэнергии по обобщенным характеристикам [3], а также для расчета режимов и потерь электроэнергии в разомкнутых электрических сетях 35 кВ и выше, при заданных нагрузках и напряжении источника питания [4].

В настоящей работе данный подход используется для расчета режимов и потерь электроэнергии в разомкнутых сетях с разными номинальными напряжениями при заданных нагрузках и напряжении источника питания.

Как было отмечено в [1–4], достоинством такого подхода является то, что применение аппарата вычислительных сетей Петри [5, 6] для его реализации дает возможность построить самоорганизующийся многокомпонентный вычислительный алгоритм, удобный в реализации на ЭВМ, модификации и интерпретации, а также с позиции организации параллельно-последовательных вычислений для повышения быстродействия расчета.

**Постановка задачи.** Рассматривается разветвленная сеть с  $n$  узлами и  $m$  участками (линейными и трансформаторными) с древовидной структурой, где содержатся трансформаторы связи, связывающие подсети с разными номинальными напряжениями. Считаются заданными: схема сети, мощности нагрузок, сопротивления и проводимости участков, напряжение источника питания и номинальные напряжения подсетей. Требуется определить неизвестные напряжения в узлах, потоки и потери мощности на участках, потери электроэнергии в целом в рассматриваемой сети.

*Структурная модель сети.* Схема разомкнутой электрической сети с разными номинальными напряжениями представляется в виде ориентированного графа  $(L, \Gamma)$  с древовидной структурой (см. рис. 1), где  $\Gamma$  – отображение множества  $L$  в  $L$ , оно показывает, как между собой связаны узлы сети из множества  $L$ ; в свою очередь,  $L$  – это множество узлов сети (вершин графа), т.е.:

$$\Gamma: L \rightarrow L, \quad \Gamma(i) \subset L, \quad \forall i \in L \setminus L_0, \quad (1)$$

$$\Gamma \subseteq L \times L, \quad \Gamma_i = \{i\} \times \Gamma(i), \quad \forall i \in L \setminus L_0, \quad (2)$$

$$\Gamma = \bigcup_{i \in L \setminus L_0} \Gamma_i, \quad L \setminus \{0\} = \bigcup_{i \in L \setminus L_0} \Gamma(i), \quad L_0 \subset L, \quad (3)$$

$$\Gamma(i) = \emptyset, \quad \Gamma_i = \emptyset, \quad \forall i \in L_0, \quad (4)$$

где  $L \setminus L_0$  – множество промежуточных вершин графа  $(L, \Gamma)$ , включая его вершину  $i=0$ , т.е. включая узел питания сети;  $L_0$  – множество конечных вершин графа  $(L, \Gamma)$  (концевых (нагрузочных) узлов сети);  $\Gamma_i$  – множество дуг  $(i, j)$ ;  $\Gamma(i)$  – множество конечных вершин дуг (узел  $i \in L \setminus L_0$  является начальной вершиной).

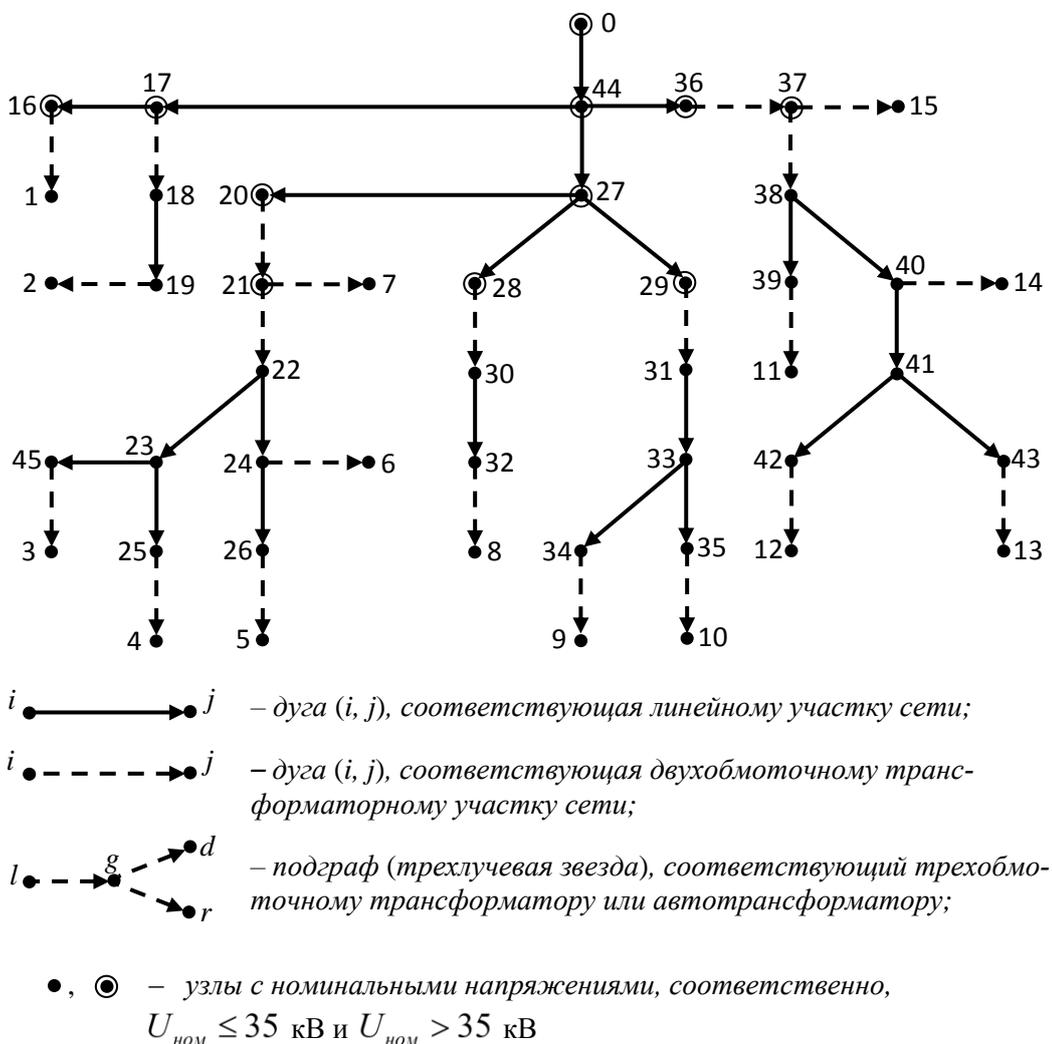


Рисунок 1 – Граф разомкнутой электрической сети с разными номинальными напряжениями

Элементами вводимого множества  $L_{звезд}$  являются номера внутренних узлов подграфов (трехлучевых звезд), которые соответствуют трехобмоточным трансформаторам (автотрансформаторам) электрической сети (здесь внутренний узел – это узел, соединяющий все три луча (участка) рассматриваемого подграфа). Каждая вершина  $i \in L$  данного графа  $(L, \Gamma)$  соответствует номинальному напряжению сети  $U_{ном i}$ . Элементы множеств  $L_{звезд}$  и  $\{U_{ном i} | i \in L\}$  служат в качестве признаков по выбору схемы замещения и соответствующей ей расчетной формулы для каждого участка  $(i, j) \in \Gamma$  при расчете режимов и потерь электроэнергии в сети.

На рис. 2 показаны схемы замещения элементов сети с разными номинальными напряжениями [7, 8]: а) – схема замещения двухобмоточного трансформатора при  $U_{ном} > 35$  кВ; б) – схема замещения линейного участка при  $U_{ном} > 35$  кВ; в) – схема замещения двухобмоточного трансформатора при  $U_{ном} \leq 35$  кВ; г) – схема замещения линейного участка при  $U_{ном} \leq 35$  кВ; д) – схема замещения трехобмоточного трансформатора (трехлучевая звезда) или автотрансформатора, где участок схемы  $(l, g)$  соответствует первичной обмотке;  $(g, d)$ ,  $(g, r)$  – вторичным обмоткам;  $g$  – внутренний узел трехлучевой звезды, соединяющий участки  $(l, g)$ ,  $(g, d)$ ,  $(g, r)$ . Заметим, что схема замещения участка  $(l, g)$  подобна схеме замещения а) без идеального трансформатора, а схемы участков  $(g, d)$ ,  $(g, r)$  подобны схеме замещения в).

На рис. 2 приняты следующие обозначения:  $\underline{S}_j$  – мощность, протекающая через узел;  $j \in L$  поскольку потоки мощностей направлены от узла источника питания  $i = 0$  к множеству узлов нагрузки  $L_0$  (см. рис. 1), то  $\underline{S}_{ij}^{кон} = \underline{S}_j, \forall (i, j) \in \Gamma$ ;  $\underline{U}_i, \underline{U}_j$  – напряжения узлов в начале и в конце участка  $(i, j) \in \Gamma$  соответственно;  $\underline{S}_{ij}^{нач}, \underline{S}_{ij}^{кон}$  – потоки мощностей в начале и в конце участка  $(i, j) \in \Gamma$  соответственно;  $\underline{S}_{uij}^{нач}, \underline{S}_{uij}^{кон}$  – потоки мощностей (потери) в шунтах, т.е. в поперечных ветвях начала и конца участка  $(i, j) \in \Gamma$  соответственно;  $\underline{S}_{ij}^{начZ}, \underline{S}_{ij}^{конZ}$  – потоки мощностей, соответственно, в начале и в конце сопротивления  $\underline{Z}_{ij}$  участка  $(i, j) \in \Gamma$ ;  $\Delta P_{xij}$  – потери активной мощности на гистерезис и вихревые токи в стали трансформатора;  $\Delta Q_{xij}$  – потери реактивной мощности на намагничивание стали трансформатора;  $\Delta \underline{S}_{ij}$  – потери мощности в  $\underline{Z}_{ij}$ ;  $\Delta P_{корij}$  – потери активной мощности в изоляции или на корону;  $Q_{Cij}$  – зарядная мощность;  $k_{ij}$  – коэффициент трансформации.

Далее используются такие параметры элементов сети:  $R_{ij}, X_{ij}$  – активное и реактивное сопротивления продольной ветви участка  $(i, j) \in \Gamma$ ;  $g_{ij}, b_{ij}$  – активная и реактивная проводимости в поперечных ветвях участка  $(i, j) \in \Gamma$ , предназначенные для расчета перечисленных параметров режима работы.

Процедура выбора схемы замещения и соответствующей ей расчетной формулы для каждого участка  $(i, j) \in \Gamma$  при расчете режимов и потерь электроэнергии в сети описывается с помощью предикатных функций, приведенных в табл. 1.

В табл. 1 приняты следующие обозначения:  $F_H^{(p)}[...]$  – операторы для расчета потоков ( $H$ ) мощности участка  $(i, j)$   $p$ -го типа;  $F_H^{(p)}[...]$  – операторы для расчета напряжений ( $H$ ) в узлах на концах участков  $(i, j)$   $p$ -го типа.

**Пример.** Для представленного на рис. 1 ориентированного графа сети имеем:  $L = \{0, 1, 2, \dots, 45\}$ ;  $L_0 = \{1, 2, 3, \dots, 15\}$ ;  $L \setminus L_0 = \{0, 16, \dots, 44\}$ ; в табл. 2 представлены

множества  $\Gamma(i)$ ,  $\Gamma_i$ ,  $\forall i \in L \setminus L_0$  из (1–4), соответствующие данному примеру; множество дуг  $\Gamma$  получается с помощью формулы (3), т.е. объединением множеств  $\Gamma_i$ ,  $\forall i \in L \setminus L_0$  (см. табл. 2).

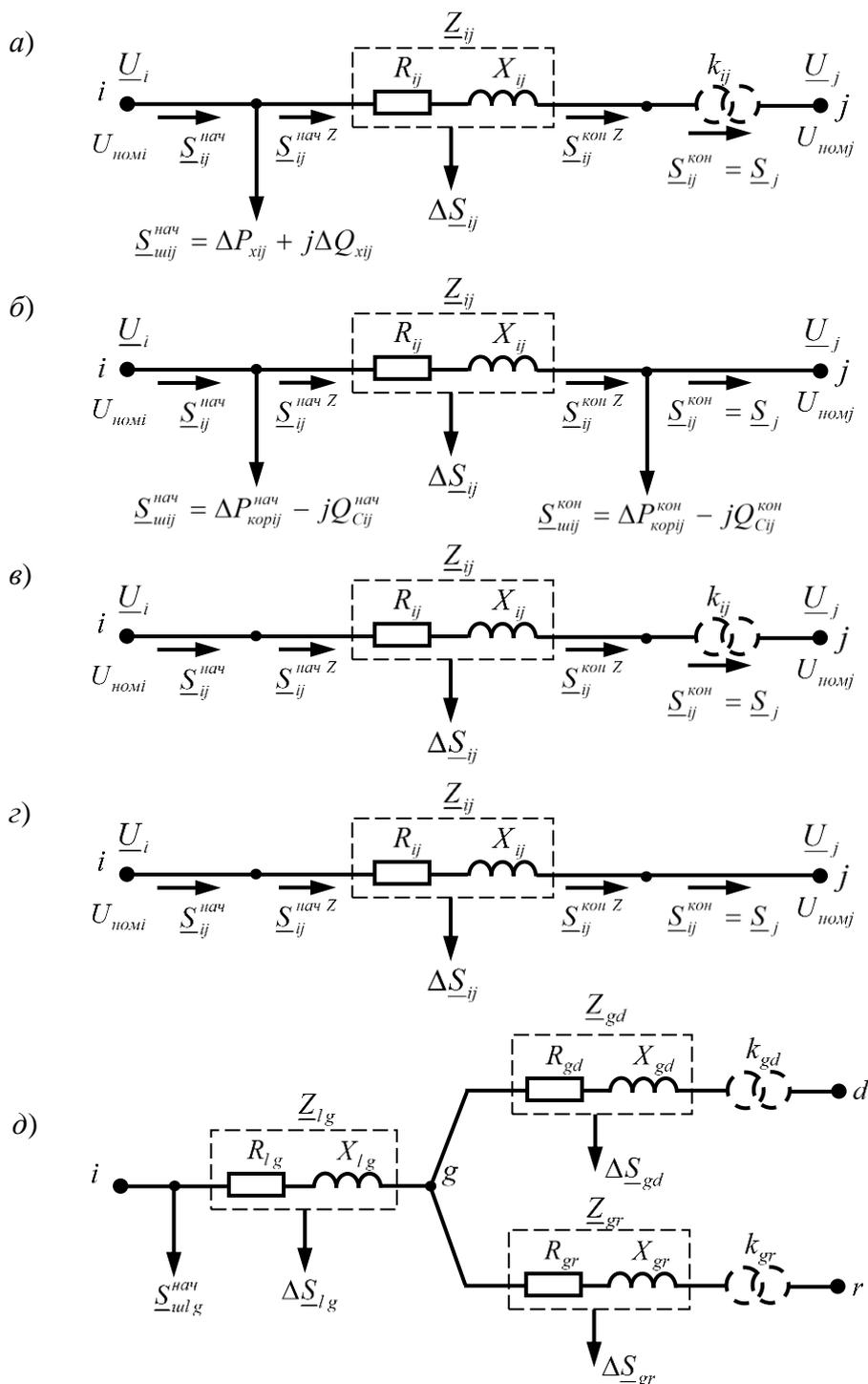


Рисунок 2 – Схемы замещения участков электрических сетей с разными номинальными напряжениями

В представленном графе электрической сети показано следующее:  
 - все концевые участки сети являются двухобмоточными трансформаторами, конечные узлы которых образуют множество нагрузочных узлов  $L_0$ ;

Таблица 1 – Предикатные функции по выбору схемы замещения и расчетной формулы для каждого участка  $(i, j) \in \Gamma$  сети

Номер типа участка ( $p$ )	Предикатные функции по выбору схемы замещения и расчетной формулы для каждого участка $(i, j) \in \Gamma$	Схемы замещения: (рис. 2)	Операторы для расчета потоков $F_{\Pi}^{(*)}[\dots]$ и напряжений $F_H^{(*)}[\dots]$ в узлах сети
1	$(j \notin L_{звез}) \wedge (U_{номі} > 35 \text{ кВ}) \wedge (U_{номі} > U_{номј})$	а)	$F_{\Pi}^{(1)}[\dots]$ $F_H^{(1)}[\dots]$
2	$(j \notin L_{звез}) \wedge (U_{номі} > 35 \text{ кВ}) \wedge (U_{номі} = U_{номј})$	б)	$F_{\Pi}^{(2)}[\dots]$ $F_H^{(2)}[\dots]$
3	$(j \notin L_{звез}) \wedge (U_{номі} \leq 35 \text{ кВ}) \wedge (U_{номі} > U_{номј})$	в)	$F_{\Pi}^{(3)}[\dots]$ $F_H^{(1)}[\dots]$
4	$(j \notin L_{звез}) \wedge (U_{номі} \leq 35 \text{ кВ}) \wedge (U_{номі} = U_{номј})$	г)	$F_{\Pi}^{(4)}[\dots]$ $F_H^{(2)}[\dots]$
5	$(j \in L_{звез}) \wedge (U_{номі} > 35) \wedge (U_{номі} = U_{номј})$	д), где $i=l, j=g$	$F_{\Pi}^{(5)}[\dots]$ $F_H^{(2)}[\dots]$
6	$(i \in L_{звез}) \wedge (U_{номі} > 35) \wedge (U_{номі} > U_{номј})$	д), где $i=g, j=d$ или $r$	$F_{\Pi}^{(3)}[\dots]$ $F_H^{(1)}[\dots]$

- на участках (17, 18), (28, 30), (29, 31) установлены двухобмоточные трансформаторы связи между линиями сети разного номинального напряжения;

- два трехобмоточных трансформатора связи между линиями сети разного номинального напряжения: первому соответствует трехлучевая звезда из трех участков (20, 21), (21, 7), (21, 22) с внутренним узлом  $g = 21$ ; второму – трехлучевая звезда из трех участков (36, 37), (37, 15), (37, 38) с внутренним узлом  $g = 37$ . Здесь участки (20, 21), (36, 37) соответствуют первичным обмоткам, а участки (21, 7), (21, 22) и (37, 15), (37, 38) – вторичным обмоткам трехобмоточного трансформатора связи;

- трансформаторы связи разбивают исходный граф сети на два подграфа: подграф с нижней ступенью номинального напряжения  $U_{ном} \leq 35$  кВ, узлы которого показаны в виде точки "●"; подграф с верхней ступенью номинального напряжения  $U_{ном} > 35$  кВ, узлы которого показаны в виде точки с кружком. Множество внутренних узлов трехобмоточных трансформаторов связи имеет вид  $L_{звез} = \{21, 37\}$ .

*Содержательное описание структурированного иерархически-многоуровневого подхода к расчету потерь электроэнергии и режимов ее работы.*

Для расчета режимов и потерь электроэнергии в разомкнутых электрических сетях с разными номинальными напряжениями нами использован двухэтапный метод, как и в ранее рассмотренных работах [1–4]: на 1-м этапе определяются потоки и потери мощности в линиях и трансформаторах (автотрансформаторах) от нагрузок до источника питания (снизу вверх); на 2-м этапе в обратном порядке вычисляются напряжения  $U_i$  в узлах  $i \in L \setminus \{0\}$  от источника питания до нагрузок (сверху вниз).

В отличие от [1–4], в настоящей работе рассматриваются электрические сети с разными номинальными напряжениями, т.е. сети, состоящие из двух подсетей: подсеть

с номинальным напряжением  $U_{ном} \leq 35$  кВ и подсеть с  $U_{ном} > 35$  кВ. Для расчета подсети с  $U_{ном} > 35$  кВ используется двухэтапный итерационный метод [7, 8], когда этапы «снизу вверх» и «сверху вниз» повторяются до получения требуемой точности расчета. Для расчета подсети с  $U_{ном} \leq 35$  кВ применен двухэтапный метод с одним проходом этапов «снизу вверх» и «сверху вниз».

Таблица 2 – Множества  $\Gamma(i)$  и  $\Gamma_i, \forall i \in L \setminus L_0$

	Множества $\Gamma(i) \forall i \in L \setminus L_0$	Множества $\Gamma_i$ $\forall i \in L \setminus L_0$
1	$\Gamma(0) = \{44\}$	$\Gamma_0 = \{(0, 44)\}$
2	$\Gamma(16) = \{1\}$	$\Gamma_{16} = \{(16, 1)\}$
3	$\Gamma(17) = \{16, 18\}$	$\Gamma_{17} = \{(17, 16), (17, 18)\}$
4	$\Gamma(18) = \{19\}$	$\Gamma_{18} = \{(18, 19)\}$
5	$\Gamma(19) = \{2\}$	$\Gamma_{19} = \{(19, 2)\}$
6	$\Gamma(20) = \{21\}$	$\Gamma_{20} = \{(20, 21)\}$
7	$\Gamma(21) = \{7, 22\}$	$\Gamma_{21} = \{(21, 7), (21, 22)\}$
8	$\Gamma(22) = \{23, 24\}$	$\Gamma_{22} = \{(22, 23), (22, 24)\}$
9	$\Gamma(23) = \{25, 45\}$	$\Gamma_{23} = \{(23, 25), (23, 45)\}$
10	$\Gamma(24) = \{6, 26\}$	$\Gamma_{24} = \{(24, 6), (24, 26)\}$
11	$\Gamma(25) = \{4\}$	$\Gamma_{25} = \{(25, 4)\}$
12	$\Gamma(26) = \{5\}$	$\Gamma_{26} = \{(26, 5)\}$
13	$\Gamma(27) = \{20, 28, 29\}$	$\Gamma_{27} = \{(27, 20), (27, 28), (27, 29)\}$
14	$\Gamma(28) = \{30\}$	$\Gamma_{28} = \{(28, 30)\}$
15	$\Gamma(29) = \{31\}$	$\Gamma_{29} = \{(29, 31)\}$
16	$\Gamma(30) = \{32\}$	$\Gamma_{30} = \{(30, 32)\}$
17	$\Gamma(31) = \{33\}$	$\Gamma_{31} = \{(31, 33)\}$
18	$\Gamma(32) = \{8\}$	$\Gamma_{32} = \{(32, 8)\}$
19	$\Gamma(33) = \{34, 35\}$	$\Gamma_{33} = \{(33, 34), (33, 35)\}$
20	$\Gamma(34) = \{9\}$	$\Gamma_{34} = \{(34, 9)\}$
21	$\Gamma(35) = \{10\}$	$\Gamma_{35} = \{(35, 10)\}$
22	$\Gamma(36) = \{37\}$	$\Gamma_{36} = \{(36, 37)\}$
23	$\Gamma(37) = \{15, 38\}$	$\Gamma_{37} = \{(37, 15), (37, 38)\}$
24	$\Gamma(38) = \{39, 40\}$	$\Gamma_{38} = \{(38, 39), (38, 40)\}$
25	$\Gamma(39) = \{11\}$	$\Gamma_{39} = \{(39, 11)\}$
26	$\Gamma(40) = \{14, 41\}$	$\Gamma_{40} = \{(40, 14), (40, 41)\}$
27	$\Gamma(41) = \{42, 43\}$	$\Gamma_{41} = \{(41, 42), (41, 43)\}$
28	$\Gamma(42) = \{12\}$	$\Gamma_{42} = \{(42, 12)\}$
29	$\Gamma(43) = \{13\}$	$\Gamma_{43} = \{(43, 13)\}$
30	$\Gamma(44) = \{17, 27, 36\}$	$\Gamma_{44} = \{(44, 17), (44, 27), (44, 36)\}$
31	$\Gamma(45) = \{3\}$	$\Gamma_{45} = \{(45, 3)\}$

По аналогии с [1–4] для организации и установления такой последовательности вычислений, исходный граф представляется в виде иерархически многоуровневой структуры.

Поскольку исходная сеть состоит из двух подсетей с разными номинальными напряжениями  $U_{ном} \leq 35$  кВ и  $U_{ном} > 35$  кВ, то многоуровневая структура представлена

в виде двух ступеней с разными номинальными напряжениями: I ступень с  $U_{ном} \leq 35$  кВ; II ступень с  $U_{ном} > 35$  кВ (для рассматриваемого примера сети см. рис. 3). Функциональная схема иерархически многоуровневого подхода к расчету режимов и потерь электроэнергии показана на рис. 4.

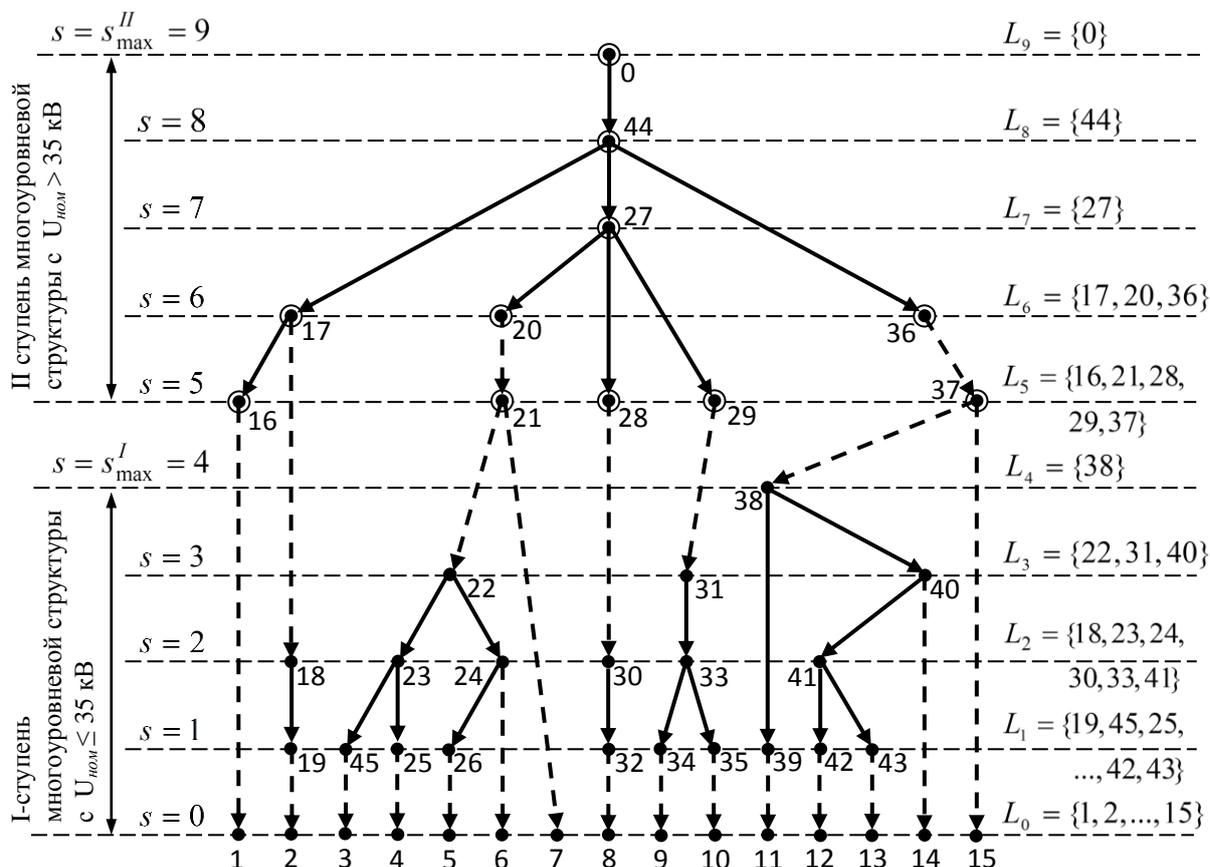


Рисунок 3 – Иерархически-многоуровневая структура исходного графа сети  $(L, \Gamma)$  с двумя ступенями номинального напряжения

Предлагаемый подход состоит из следующих шагов.

**1. Представление исходного графа сети в виде иерархически многоуровневой структуры с двумя ступенями номинального напряжения (см. рис. 3).**

*Шаг 0.* Вычислить  $s = 0$  и из концевых вершин исходного графа сети сформировать множество вершин  $s = 0$ -го уровня иерархии, т.е. множество  $L_0$ .

*Шаг 1.* При  $s = 0$  сформировать начальное состояние множеств  $L_s^B, L_s^H$ :

$$L_0^B = L \setminus L_0, \quad L_0^H = L_0. \quad (5)$$

*Шаг 2.* Задать начальное значение номера ступени номинального напряжения:  $a = 0$ .

*Шаг 3.* Вычислить номер следующей ступени:  $a = a + 1$ .

*Шаг 4.* Далее вычислить  $s = s + 1$ .

$$L_s = \{i \in L_{s-1}^B \mid (\Gamma(i) \subseteq L_{s-1}^H) \wedge (U_{номi} \leq 35)\}. \quad (6)$$

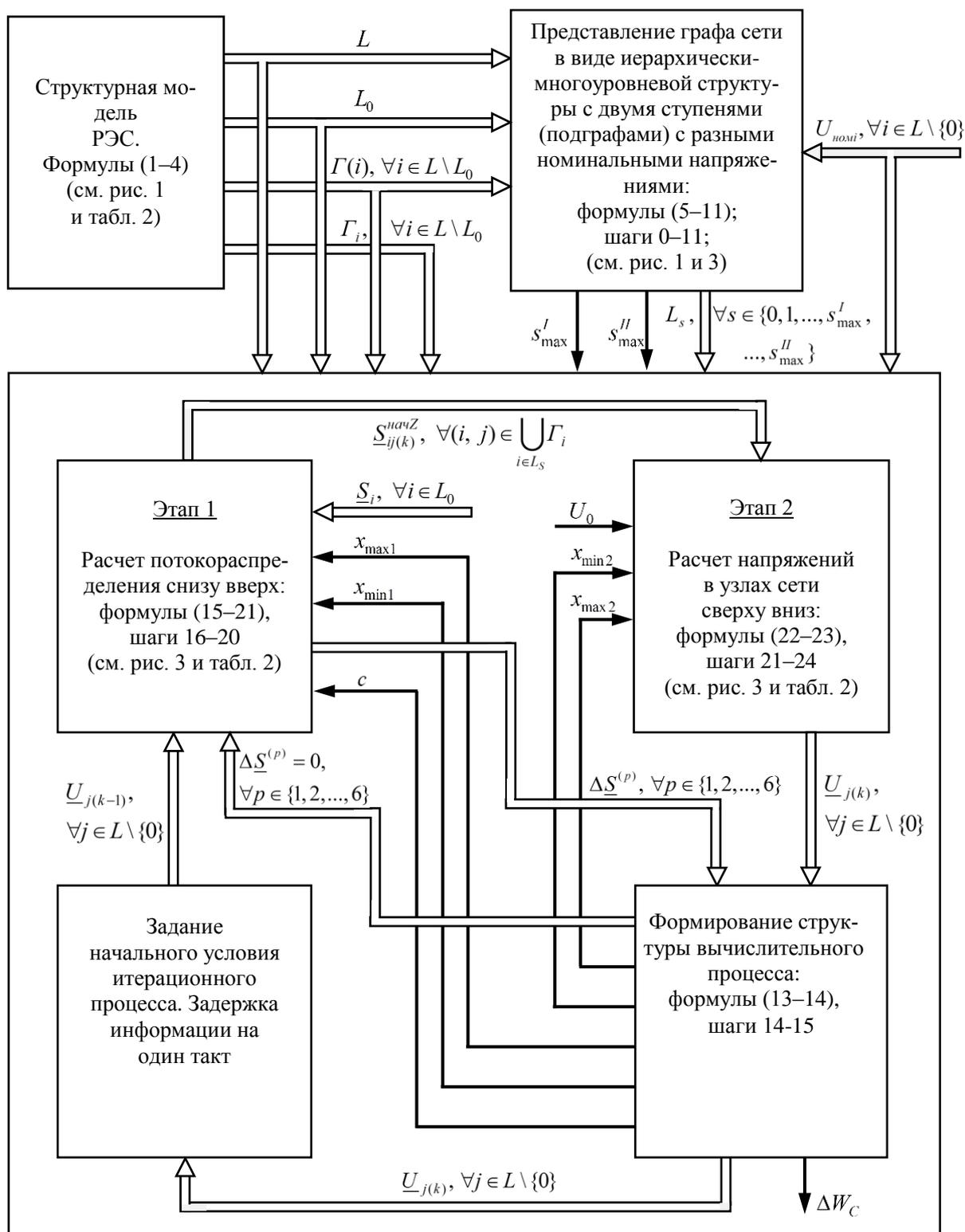


Рисунок 4 – Структурированный иерархически-многоуровневый подход к расчету режимов и потерь электроэнергии в разомкнутых сетях с разными номинальными напряжениями при заданных нагрузках и напряжении источника питания

Шаг 5. Если  $a = 1$ , то требуется сформировать множество  $L_s$  информационно обеспеченных [1-4] вершин  $s$ -го уровня иерархии первой ступени многоуровневой структуры с  $U_{ном} \leq 35$  кВ:

*Шаг 6.* Если  $a = 2$ , то требуется сформировать множество  $L_s$  информационно обеспеченных [1–4] вершин  $s$ -го уровня иерархии второй ступени многоуровневой структуры с  $U_{ном} > 35$  кВ:

$$L_s = \{i \in L_{s-1}^B \mid (\Gamma(i) \subseteq L_{s-1}^H) \wedge (U_{ном} > 35)\}. \quad (7)$$

*Шаг 7.* При  $L_s \neq \emptyset$  требуется рассчитать новое состояние множеств  $L_s^B, L_s^H$ :

$$L_s^B = L_{s-1}^B \setminus L_s, \quad (8)$$

$$L_s^H = L_{s-1}^H \cup L_s, \text{ где } L_s^B \cup L_s^H = L, \forall s \in \{0, 1, 2, \dots\}. \quad (9)$$

*Шаг 8.* Если  $L_s = \emptyset$ , то идет переход к шагу 9, иначе – к шагу 4.

*Шаг 9.* При  $a = 1, s = s - 1, s_{\max}^I = s. \quad (10)$

*Шаг 10.* При  $a = 2, s = s - 1, s_{\max}^{II} = s. \quad (11)$

*Шаг 11.* Если  $L_s^B \neq \emptyset$  (или  $L_s^H \neq L$ ), то перейти к шагу 3, иначе – перейти к блоку расчета режимов и потерь электроэнергии в сети, т.е. к шагу 12.

Результатами выполнения данного алгоритма являются: множество номеров уровней  $\{0, 1, 2, \dots, s_{\max}^I\}$  первой ступени многоуровневой структуры с  $U_{ном} \leq 35$  кВ; множество номеров уровней  $\{s_{\max}^I + 1, s_{\max}^I + 2, \dots, s_{\max}^{II}\}$  второй ступени многоуровневой структуры с  $U_{ном} > 35$  кВ, множество вершин графа сети для каждого  $s$ -го уровня иерархии:  $L_s, \forall s \in \{0, 1, 2, \dots, s_{\max}^I, \dots, s_{\max}^{II}\}$ .

2. Расчет режимов и потерь электроэнергии в сетях с разными номинальными напряжениями.

*Шаг 12.* Задать напряжение источника питания  $U_0$  (узел  $i = 0$ ), а также мощности нагрузок  $\underline{s}_j, \forall j \in L_0$ .

*Шаг 13.* На  $k = 0$ -м такте итерации вычислить  $c = 1, k = 0$  и напряжения в узлах сети принять равными номинальным:

$$\underline{U}_{i(0)} = U_{ном}, \quad \forall i \in L \setminus \{0\}. \quad (12)$$

*Шаг 14.* Вычислить номер следующего такта итерации:  $k = k + 1$ .

*Шаг 15.* Формирование структуры вычислительного процесса при расчете сети с разными номинальными напряжениями:

- формирование структуры вычисления на  $k = 1$ -м такте итерации:

если  $k = 1$ , то (13)

$$\{x_{\min 1} = 0, x_{\max 1} = s_{\max}^{II},$$

$$x_{\min 2} = s_{\max}^I, x_{\max 2} = s_{\max}^{II}\};$$

- формирование структуры вычисления при  $k > 1$  и условие останова:

если  $k > 1$ , то (14)

$$\begin{aligned} & \{ \text{если } (|U_{j(k-1)} - U_{j(k-2)}| > \varepsilon, \forall j \in \bigcup_{i \in L_{(s_{\max}+1)}} \Gamma_i), \text{ то} \\ & \{ x_{\min 1} = s_{\max}^I, x_{\max 1} = s_{\max}^{II}, \\ & x_{\min 2} = s_{\max}^I, x_{\max 2} = s_{\max}^{II}, \Delta S^{(p)} = 0, \forall p \in \{1, 2, \dots, 6\}, \text{ иначе} \\ & \{ c = 0, x_{\min 2} = 0, x_{\max 2} = s_{\max}^I \} \}, \end{aligned}$$

где  $x_{\min 1}, x_{\max 1}$  – нижний и верхний пределы изменения номера уровня иерархии  $s$  на 1-м этапе (снизу вверх) соответственно;  $x_{\min 2}, x_{\max 2}$  – нижний и верхний пределы изменения  $s$  на 2-ом этапе (сверху вниз) соответственно;  $c \in \{0, 1\}$  – значение ключа для включения ( $c = 1$ ) и отключения ( $c = 0$ ) вычислительного модуля «снизу вверх» на последнем такте итерации  $k$ ;  $\Delta S^{(p)} = 0, \forall p \in \{1, 2, \dots, 6\}$  – суммарные потери мощности по разным типам участков (см. рис. 2 и табл. 1).

Первый этап. Расчет потокораспределения (алгоритм функционирования модуля «снизу вверх»).

*Шаг 16.* При  $c = 1$  требуется перейти к шагу 17, иначе – к шагу 21.

*Шаг 17.* Рассчитать начальное значение номера уровня иерархии:  $s = x_{\min 1}$ .

*Шаг 18.* Рассчитать номер следующего верхнего уровня иерархии:  $s = s + 1$ .

*Шаг 19.* Рассчитать для каждого участка  $(i, j) \in \Gamma_i$  и каждого узла  $i \in L_s$  следующее: потери мощности  $\Delta S_{ij(k)}$  в сопротивлении  $Z_{ij}$  участка  $(i, j)$  для расчета потери электроэнергии в сети в целом; поток мощности  $S_{ij(k)}^{начZ}$  в начале сопротивления  $Z_{ij}$  участка  $(i, j)$  для расчета напряжения  $U_{j(k)}$  в конце участка  $j$  на втором этапе; поток мощности  $S_{ij(k)}^{нач}$  в начале участка  $(i, j)$  для расчета потока мощности узла  $i$ ; поток мощности  $S_{i(k)}$  узла  $i$ .

Перечисленные мощности в зависимости от типа участков  $(i, j)$  вычисляются следующим образом (см. рис. 2 и табл. 1):

- для участков  $(i, j)$  с двухобмоточными трансформаторами с  $U_{ном i} > 35$  кВ (см. рис. 2,а и табл. 1, строка 1):

$$\begin{aligned} & \text{если } ((j \notin L_{звезд}) \wedge (U_{ном i} > 35) \wedge (U_{ном i} > U_{ном j})), \quad (15) \\ & \text{то } \{ [\Delta S_{ij(k)}, S_{ij(k)}^{начZ}, S_{ij(k)}^{нач}] = F_{II}^{(1)}[S_{j(k)}, U_{i(k-1)}, U_{j(k-1)}], \\ & \Delta S^{(1)} = \Delta S^{(1)} + \Delta S_{ij(k)} \}; \end{aligned}$$

- для участков  $(i, j)$  с воздушными линиями электропередач с  $U_{ном i} > 35$  кВ (см. рис. 2,б и табл. 1, строка 2):

$$\begin{aligned} & \text{если } ((j \notin L_{звезд}) \wedge (U_{ном i} > 35) \wedge (U_{ном i} = U_{ном j})), \quad (16) \\ & \text{то } \{ [\Delta S_{ij(k)}, S_{ij(k)}^{начZ}, S_{ij(k)}^{нач}] = F_{II}^{(2)}[S_{j(k)}, U_{i(k-1)}, U_{j(k-1)}], \\ & \Delta S^{(2)} = \Delta S^{(2)} + \Delta S_{ij(k)} \}; \end{aligned}$$

- для участков  $(i, j)$  с двухобмоточными трансформаторами с  $U_{номі} \leq 35$  кВ (см. рис. 2,в и табл. 1, строка 3):

$$\begin{aligned} &\text{если } ((j \notin L_{звезд}) \wedge (U_{номі} \leq 35) \wedge (U_{номі} > U_{номј})), & (17) \\ &\text{то } \left\{ [\Delta \underline{S}_{ij(k)}, \underline{S}_{ij(k)}^{начZ}, \underline{S}_{ij(k)}^{нач}] = F_{II}^{(3)} [\underline{S}_{j(k)}, U_{j(k-1)}], \right. \\ &\quad \left. \Delta \underline{S}^{(3)} = \Delta \underline{S}^{(3)} + \Delta \underline{S}_{ij(k)} \right\}; \end{aligned}$$

- для участков  $(i, j)$  с воздушными линиями электропередач с  $U_{номі} \leq 35$  кВ (см. рис. 2,г и табл. 1, строка 4):

$$\begin{aligned} &\text{если } ((j \notin L_{звезд}) \wedge (U_{номі} \leq 35) \wedge (U_{номі} = U_{номј})), & (18) \\ &\text{то } \left\{ [\Delta \underline{S}_{ij(k)}, \underline{S}_{ij(k)}^{начZ}, \underline{S}_{ij(k)}^{нач}] = F_{II}^{(4)} [\underline{S}_{j(k)}, U_{j(k-1)}], \right. \\ &\quad \left. \Delta \underline{S}^{(4)} = \Delta \underline{S}^{(4)} + \Delta \underline{S}_{ij(k)} \right\}; \end{aligned}$$

- для участков  $(i, j)$  с первичными обмотками трехобмоточных трансформаторов с  $U_{номі} > 35$  кВ (см. рис. 2,д и табл. 1, строка 5):

$$\begin{aligned} &\text{если } ((j \in L_{звезд}) \wedge (U_{номі} > 35) \wedge (U_{номі} = U_{номј})), & (19) \\ &\text{то } \left\{ [\Delta \underline{S}_{ij(k)}, \underline{S}_{ij(k)}^{начZ}, \underline{S}_{ij(k)}^{нач}] = F_{II}^{(5)} [\underline{S}_{j(k)}, U_{i(k-1)}, U_{j(k-1)}], \right. \\ &\quad \left. \Delta \underline{S}^{(5)} = \Delta \underline{S}^{(5)} + \Delta \underline{S}_{ij(k)} \right\}; \end{aligned}$$

- для участков  $(i, j)$  со вторичными обмотками трехобмоточных трансформаторов с  $U_{номі} > 35$  кВ (см. рис. 2,д и табл. 1, строка 6):

$$\begin{aligned} &\text{если } ((i \in L_{звезд}) \wedge (U_{номі} > 35) \wedge (U_{номі} > U_{номј})), & (20) \\ &\text{то } \left\{ [\Delta \underline{S}_{ij(k)}, \underline{S}_{ij(k)}^{начZ}, \underline{S}_{ij(k)}^{нач}] = F_{II}^{(3)} [\underline{S}_{j(k)}, U_{j(k-1)}], \right. \\ &\quad \left. \Delta \underline{S}^{(6)} = \Delta \underline{S}^{(6)} + \Delta \underline{S}_{ij(k)} \right\}. \end{aligned}$$

Используя полученные потоки мощностей  $\underline{S}_{ij(k)}^{нач}$ ,  $\forall (i, j) \in \Gamma_i$ ,  $\forall i \in L_s$ , вычислить потоки мощностей для каждого узла  $i \in L_s$ :

$$\underline{S}_{i(k)} = \sum_{j \in \Gamma_i} \underline{S}_{ij(k)}^{нач}, \quad \forall i \in L_s. \quad (21)$$

*Шаг 20.* Если  $s < x_{\max 1}$ , то перейти к шагу 18, иначе – к шагу 21.

Второй этап. Расчет напряжений в узлах сети (алгоритм функционирования модуля «сверху вниз»).

*Шаг 21.* Вычислить начальное значение номера уровня иерархии  $s = x_{\max 2}$ .

*Шаг 22.* Вычислить для конечного узла  $j$  каждого участка  $(i, j) \in \Gamma_i$  напряжение  $\underline{U}_{j(k)}$  и его модуль  $U_{j(k)}$  для расчета потокораспределения на первом этапе следующего  $k+1$ -го такта итерации, а также его фазу  $\delta_{j(k)}$ :

- для участков  $(i, j)$  с двухобмоточными трансформаторами или для участков  $(i, j)$  со вторичными обмотками трехобмоточных трансформаторов:

$$\begin{aligned} &\text{если } (U_{номі} > U_{номј}), & (22) \\ &\text{то } \left\{ [\underline{U}_{j(k)}, U_{j(k)}, \delta_{j(k)}] = F_H^{(1)} [\underline{U}_{i(k)}, U_{i(k)}, \underline{S}_{ij(k)}^{начZ}] \right\}; \end{aligned}$$

- для участков  $(i, j)$  с воздушными линиями электропередач или для участков  $(i, j)$  с первичными обмотками трехобмоточных трансформаторов:

$$\text{если } (U_{\text{ном}i} = U_{\text{ном}j}), \quad (23)$$

$$\text{то } \{[\underline{U}_{j(k)}, U_{j(k)}, \delta_{j(k)}] = F_H^{(2)}[\underline{U}_{i(k)}, U_{i(k)}, \underline{S}_{ij(k)}^{нач}]\}.$$

*Шаг 23.* Рассчитать номер следующего нижнего уровня иерархии:  $s = s - 1$ .

*Шаг 24.* При  $s > 0$  идет переход к шагу 22, иначе к шагу 25.

*Шаг 25.* Если  $c = 1$ , то перейти к шагу 14, иначе к шагу 26.

*Шаг 26.* Далее рассчитать суммарные потери мощности и электроэнергии в сети:

$$\Delta S_C = \sum_{p=1}^6 \Delta S^{(p)} = \Delta P_C + j\Delta Q_C; \quad (24)$$

$$\Delta W_C = \Delta t \cdot \Delta P_C, \quad (25)$$

где  $\Delta t$  – интервал времени, в течение которого напряжение источника и мощности нагрузок постоянны, т.е.

$$\underline{U}_0 = const, \quad \underline{S}_j = const, \quad \forall j \in L_0. \quad (26)$$

**Заключение.** Таким образом в данной работе для расчета режимов и потерь электроэнергии в разомкнутых электрических сетях с разными номинальными напряжениями при заданных нагрузках и напряжении источника питания разработан структурированный иерархически-многоуровневый подход. В предложенном подходе исходный граф сети представляется в виде иерархически-многоуровневой структуры, разбитой на две ступени с  $U_{\text{ном}} \leq 35$  кВ и  $U_{\text{ном}} > 35$  кВ, и используется традиционный инженерный двухэтапный метод вычисления в котором производятся в определенной последовательности, двигаясь снизу вверх (этап 1) и сверху вниз (этап 2) по структуре рассматриваемой сети. Поскольку сеть рассматриваемого класса состоит из разного типа участков (линейные с  $U_{\text{ном}} \leq 35$  кВ и  $U_{\text{ном}} > 35$  кВ, двухобмоточные трансформаторные с  $U_{\text{ном}} \leq 35$  кВ и  $U_{\text{ном}} > 35$  кВ, первичные и вторичные обмотки трехобмоточных трансформаторов (автотрансформаторов), то для организации вычислительного процесса установлены признаки и предикатные функции по выбору схем замещения и соответствующих им расчетных формул для каждого типа участков. Также предусмотрено разделение вычислительного процесса для двух ступеней иерархически-многоуровневой структуры, т.е. для первой ступени – двухэтапный метод с одним проходом снизу вверх и сверху вниз, а для второй ступени – двухэтапный итерационный метод.

Использование такого подхода позволило получить алгоритм, который является структурноподобным рассматриваемой сети, а также эффективным (с позиций количества вычислительных операций и объема потребляемой памяти ЭВМ) и универсальным (для сложных сетей произвольной конфигурации). Данный алгоритм можно реализовать с помощью программного комплекса LabView, использование которого отражено в работе [9].

*Литература:*

1. Асанова С.М. Распределительные электрические системы, распознающие обрывы проводов на участках линий электропередач // Проблемы автоматизации и управления: – 2010. – №2. – С. 154–158.
2. Асанова С.М., Актаев Э.Т., Сатаркулов К.А. Структурированный иерархически-многоуровневый подход к поэлементному расчету нагрузочных потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях // Известия КГТУ. – Бишкек, 2015. – №3(36). – С. 151–158.
3. Актаев Э.Т. Структурированный иерархически-многоуровневый подход к эквивалентированию распределительных электрических сетей при оценке потерь электроэнергии по обобщенным характеристикам // Известия вузов Кыргызстана. – Бишкек, 2016. – №4. – С.6–11.
4. Асанова С.М., Актаев Э.Т. Структурированный иерархически-многоуровневый подход к расчету потерь электроэнергии в разомкнутых электрических сетях 35 кВ и выше при заданных нагрузках и напряжении источника питания // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – Бишкек, 2016. – №4. – С. 22–30.
5. Асанов М.С., Асанова С.М., Сатаркулов К.А. Структурная модель вычислительных сетей Петри // Известия КГТУ. – Бишкек, 2008. – №13. – С. 78–85.
6. Асанов М.С., Асанова С.М., Сатаркулов К.А. Вычислительные компоненты, язык описания и правила функционирования вычислительных сетей Петри // Известия КГТУ.– Бишкек, 2008. – №13.– С.85–95.
7. Фурсанов М.И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем. – МН.: УВИЦ при УП (Белэнергосбережение), 2005.
8. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии.– Ростов на Дону.: Изд-во Феникс, Красноярск, 2008.–718 с.
9. Ниязова Г.Н., Айдарова А.Р., Яблочников А.М. Решение некоторых задач электроэнергетики с помощью компьютерных технологий // Проблемы автоматизации и управления. – 2015. – №2 (29). – С. 75–81.

**У. А. Калматов**, *ikalmatov@bk.ru*

*Кыргызский государственный технический университет  
им. И. Раззаков,, г. Бишкек.*

**К. Сатаркулов**

*Институт автоматизации и информационных технологий, г. Бишкек*

## **ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО ХАРАКТЕРУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ВЕРХНИХ СЛОЯХ МАСЛА**

В статье рассматривается способ диагностирования межвитковых замыканий (МЗ) в силовых масляных трансформаторах (СМТ).

В основе предлагаемого метода теплового контроля лежит зависимость температуры локальных участков обмотки СМТ от дефектов различного вида, которые существуют на этом участке. В результате увеличения температуры трансформаторного масла (ТМ) на этом участке за счет возникшей подъемной силы подогретое ТМ устремляется вверх из поврежденного локального участка обмотки. Значение температуры устремленного вверх масла может быть зарегистрировано термодатчиком, расположенным над обмоткой.

*Ключевые слова:* силовые масляные трансформаторы; тепловой процесс; охлаждение; трансформаторное масло; диагностика; магнитопрод.

От надежной работы силовых масляных трансформаторов (СМТ) в значительной степени зависит надежность электроснабжения потребителей [1, 2].

Для обеспечения бесперебойной работы СМТ необходимо улучшить качество его обслуживания и ремонт. Современный подход таков, что техобслуживание и ремонт СМТ производятся по его состоянию. Методы, с помощью которых определяется состояние маслonaполненного оборудования, следующие: хроматография масла для определения растворенных в них газов, акустический контроль, тепловизионный способ диагностирования и др. [3, 4]. Для предотвращения аварийного отказа необходимо повысить требования к системе диагностирования СМТ. По нашему мнению, такие задачи можно эффективно решать, используя комплексный подход, т.е. совершенствуя методы, средства, алгоритмы диагностирования [4, 5].

### **Постановка задачи**

Анализ научно-технической литературы [5] показал, что *вопрос идентификации внутренних развивающихся дефектов по тепловому полю, изучен недостаточно*

Статья посвящена решению задачи диагностирования межвитковых замыканий по температуре масла в верхних слоях над его обмотками. Для этого предложен новый способ мониторинга температурного поля в этих слоях.

В принципе, температурное поле в любом слое масла СМТ можно найти, решив следующее уравнение [6,8]:

$$c\gamma \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta}{dx} \left( xm, o \frac{d\theta}{dx} \right) + \left( \lambda_{ym, o} \frac{d\theta}{dy} \right) + \left( \lambda_{zm, o} \frac{d\theta}{dz} \right) + q_{m, o}, \quad (1)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость материала;  $\gamma$  – удельная плотность материала;  $q_{\hat{o}, \hat{i}}$  – мощность источников теплоты магнитопровода (индекс  $\hat{o}$ ) и обмоток (индекс  $\hat{i}$ );  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  – коэффициенты теплопроводности по осям  $x, y, z$ .

Построение математической модели (1) начинается с рассмотрения феноменологической тепловой схемы замещения СМТ (рис. 1).

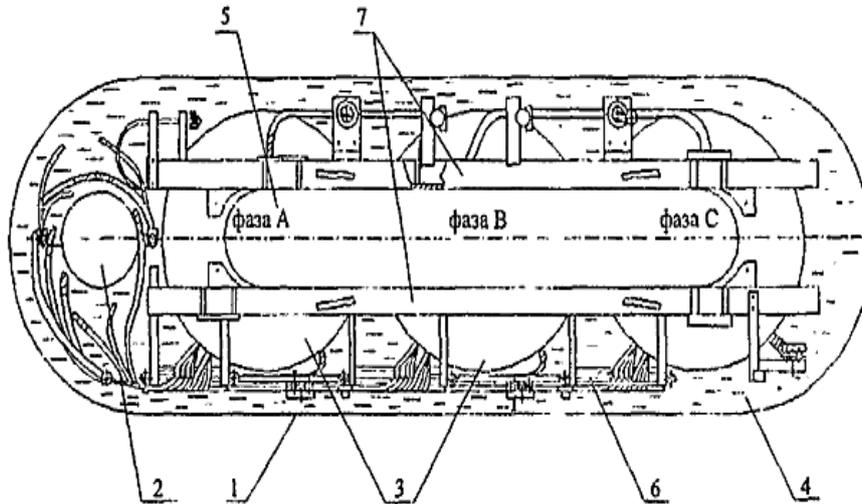


Рисунок 1 – Поперечное сечение трансформатора: 1 – бак; 2 – устройство РПН; 3 – обмотки ВН и НН; 4 – масло; 5 – ярмо, 6 – отводы обмоток; 7 – балка стяжная

В динамическом режиме уравнение нагрева трансформатора имеет вид [6]:

$$\rho C \frac{\partial \theta}{\partial t} - \text{div}(k \text{grad} \theta) = Q, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность масла, Вт/м<sup>2</sup>;  $C$  – удельная теплоемкость, Дж/град-кг;  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/град;  $\theta$  – температура, град;  $Q$  – количество теплоты, Вт/м<sup>3</sup>.

Известно, что основным методом решения уравнений (1, 2) является метод конечных элементов (МКЭ) [7]. Пример использования МКЭ для трехмерной модели силового трансформатора представлен на рис. 1 [4].

Применяя метод Галеркина к уравнению (2) совместно с МКЭ, приходим к выражению

$$\int_v [N]^T \{ - \text{div}[k \text{grad}(\theta)] + a\theta \} dV = \int_v [N]^T Q dV, \quad (3)$$

где  $[N]^T$  – вектор-столбец;  $a$  – коэффициент теплоотдачи.





Рисунок 3 – Физическая модель силового масляного трансформатора

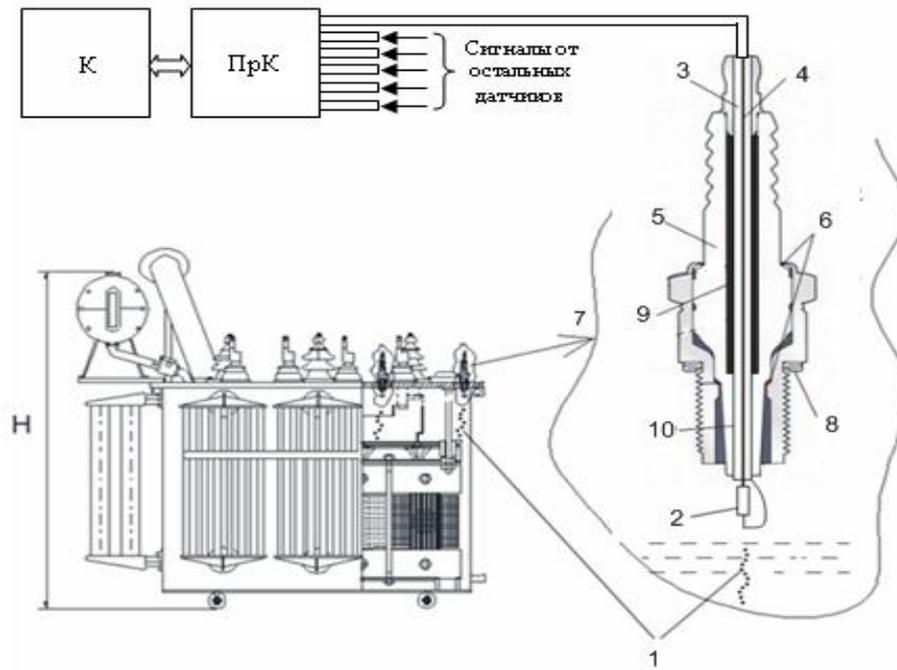


Рисунок 4 – Схематичное изображение СМТ с системой регистрации аномального теплового режима его работы

На рис. 4 изображено устройство 7 для передачи сигнала от термодатчика 2. Устройство 7 состоит из: 3 – герметик из электротехнического стекла; 4 – токопроводящий провод; 5 – изолятор из алюмооксидной керамики; 6 – внутренние уплотнения; 8 – уплотнительная шайба; 9 – медно-стеклянный герметик; 10 – токопроводящая трубка; 1– схематичное изображение движения масла от сильно перегретого участка обмотки СМТ.

Система обработки информации состоит из прибора контроля (ПрК), в состав которого входит и устройство сопряжения; компьютера и шести датчиков, расположенных в верхних слоях над обмотками трансформатора.

Прибор ПрК имеет каналы измерения: шесть – температуры масла; один – температуры воздуха; три – нагрузок каждой фазы.

В целом работа системы реализуется следующим образом. Прибор ПрК с помощью соответствующих датчиков в каждый момент изменения нагрузки в любой фазе производит измерение нагрузки каждой фазы и температуры масла над каждой обмоткой, передавая эти значения компьютеру. Программное обеспечение компьютера с помощью соответствующих алгоритмов сопоставляет графики изменения нагрузок и температур обмоток с учетом постоянного нагрева и охлаждения масла. При несовпадении этих графиков каждой фазы система подает сигнал тревоги, так как возможно, что в соответствующих обмотках происходит аномальный нагрев.

Очевидно, что основной функциональной частью предлагаемой системы диагностирования являются расчетные алгоритмы и соответственно математический аппарат, на котором они базируются. Это является предметом наших дальнейших исследований.

**Заключение.** Реализация предложенной системы диагностирования силового трансформатора находится на этапе завершения. Предварительные испытания показали справедливость выдвинутой нами гипотезы. В частности, предложен альтернативный метод анализа процесса охлаждения с помощью компьютерной модели процесса охлаждения силового трансформатора в среде Simulink.

Предлагаемая система отличается от существующих тем, что появляется возможность выявления неисправностей на раннем этапе развития дефектов.

### ***Литература***

1. Боднар В. В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов / В.В. Боднар. – М.: Энергоатомиздат. – 1983. – 176 с.
2. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С.Б. Васютинский. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
3. Костюкова Т. П., Семенов В.В. Диагностика электротехнического маслонеполненного оборудования в эксплуатации на основе тепловизионного метода контроля // ЭЛЕКТРО. – 2004. – № 3. – С. 30–32.
4. Семенов В. В. Контроль состояния маслонеполненного оборудования на основе хроматографического анализа газосодержания масла // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве (Computer-Based Conference): Материалы IX Всеросс. науч.-техн. конф. – Новгород: Новг. гос. техн. ун.-т, 2003.– С. 14–15.
5. Костюкова Т. П., Семенов В.В. Анализ видов, последствий и критических отказов силового энергетического оборудования. Методы обеспечения эксплуатационной безопасности // VII симпозиум «Электротехника 2010»: Сборник научных трудов. – М. 2003. – С. 69–72.
6. Зализный Д. И. Расчет температур основных элементов силового масляного трансформатора на основе анализа температуры поверхности его бака / Д. И. Зализный О. Г. Широков // Энергетика... (Изв. высш. учебн. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2012. – № 4. – С. 18–28.
7. Сильвестер П., Феррари Р. Методы конечных элементов для радиоинженеров и инженеров электриков. – М.: Мир, 1986. – 229 с.
8. Сатаркулов К.А., Калматов У.А., Суюнтбекова Н.А. Анализ процесса охлаждения силового трансформатора аналитическим и численным методом // Проблемы автоматизации и управления. – 2018. – № 2 (35). – С. 42–50.

*А.Р. Айдарова, Э.Б. Исаева, Ж.К. Абдыбаева, Ч.М. Бузурманкулова  
КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, Бишкек*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В НИХ**

Расширены возможности виртуального прибора разработанного с использованием программного комплекса LABVIEW, который предназначен для изучения влияния стохастических процессов на дополнительные потери мощности в воздушных линиях. В данной статье виртуальный прибор позволяет учесть при расчете дополнительных потерь мощности поверхностный эффект в проводе воздушной линии, возникающий от несинусоидальности напряжения и тока.

**Ключевые слова:** несинусоидальность напряжения и тока, поверхностный эффект, провод, воздушная линия, виртуальный прибор, LABVIEW.

### **Введение**

Для повышения эффективности использования электрической энергии (ЭЭ) требуется разработка и успешное выполнение энергосберегающих мероприятий, к которым относится и снижение потерь ЭЭ в электрических сетях, что требует проведения тщательного анализа всех его составляющих и причин их появлений. Новые средства многофункционального измерения параметров электрических режимов, которые появились в последнее время, позволяют более тщательно исследовать влияние некоторых факторов, которыми ранее при анализе пренебрегали. К таким мало исследованным факторам относится низкое качество электроэнергии (КЭ), которое характеризуется многими параметрами, одним из которых является несинусоидальность токов и напряжений. Их возникновение связано, в первую очередь, с увеличением электроприемников (ЭП) с нелинейными характеристиками, например бытовые нагрузки, в состав которых входят нелинейные и несимметричные ЭП.

### **1. Постановка задачи и предлагаемый способ решения**

Анализ научных публикаций [1, 2, 3] показывает, что при несинусоидальности, равной 5% и менее, значения дополнительных технических потерь незначительны, но при увеличении  $\hat{E}_\epsilon$  до 7–15 % потери от высоких гармоник (ВГ) возрастают до значений 10–12%, а в питающих сетях железнодорожного транспорта, трамваев и троллейбусов дополнительные потери от ВГ по отношению к потерям от синусоидальности напряжения достигают 10–15%.

Таким образом, для оценки эффективности передачи и распределения ЭЭ необходимы дальнейшие исследования по уточнению влияния малоизученных факторов на дополнительные потери мощности в элементах сети.

В работах [4, 9, 10, 11] рассмотрены возможности информационных технологий для исследования влияния различных факторов на дополнительные потери мощности в проводах воздушных линий; в [4] разработан виртуальный прибор (ВП) с использованием программного комплекса LABVIEW, предназначенный для изучения влияния стохастических процессов на дополнительные потери мощности в линиях передачи ЭЭ.

В данной статье представлены расширенные возможности ВП: он позволяет рассчитывать дополнительные потери мощности с учетом поверхностного эффекта в проводе ВЛ (рис. 1) при несинусоидальных напряжениях и токе.

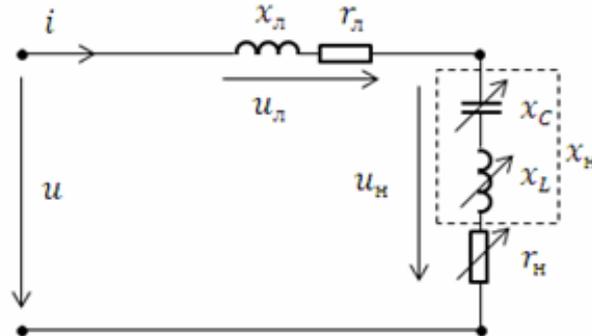


Рисунок 1 – Передача ЭЭ от источника несинусоидального напряжения  $u$  к нагрузке [4]

Рассмотрим передачу ЭЭ от источника несинусоидального напряжения к нагрузке  $z_i = r_i + jx_i$  по воздушной линии (ВЛ) электропередачи сопротивлением  $z_{\bar{e}} = r_{\bar{e}} + jx_{\bar{e}}$ .

Полная мощность на зажимах нагрузки [5] (рис. 1):

$$\begin{aligned}
 S &= z_i I^2 = \frac{z_i U^2}{|Z_{\bar{e}} + Z_i|^2} = \frac{z_i U^2}{\left| Z_{\bar{e}} \left( 1 + \frac{Z_i}{Z_{\bar{e}}} \right) \right|^2} = \frac{z_i U^2}{|Z_{\bar{e}}|^2 \left| 1 + \frac{Z_i}{Z_{\bar{e}}} \right|^2} = \\
 &= \frac{z_i U^2}{z_{\bar{e}}^2 \left| 1 + \frac{Z_i}{Z_{\bar{e}}} \right|^2} = \left( \frac{U}{z_{\bar{e}}} \right)^2 \frac{z_i}{\left| 1 + \frac{z_i}{z_{\bar{e}}} e^{j\varphi_i - \varphi_{\bar{e}}} \right|^2}. \quad (1)
 \end{aligned}$$

В выражении (1) запишем знаменатель в виде [4]:

$$\left| 1 + \frac{z_i}{z_{\bar{e}}} e^{j\varphi_i - \varphi_{\bar{e}}} \right|^2 = 1 + 2 \frac{z_i}{z_{\bar{e}}} \cos \varphi_i - \varphi_{\bar{e}} + \left( \frac{z_i}{z_{\bar{e}}} \right)^2. \quad (2)$$

Подставляя полученное значение (2) в выражение (1), окончательно имеем

$$S = \left( \frac{U}{z_{\bar{e}}} \right)^2 \frac{z_i}{1 + 2 \frac{z_i}{z_{\bar{e}}} \cos \varphi_i - \varphi_{\bar{e}} + \left( \frac{z_i}{z_{\bar{e}}} \right)^2}. \quad (3)$$

Используя (3) и выражение  $S = z_i I^2$ , определим  $I^2 = \left( \frac{U}{z_{\bar{e}}} \right)^2 \frac{1}{1 + 2 \frac{z_i}{z_{\bar{e}}} \cos \varphi_i - \varphi_{\bar{e}} + \left( \frac{z_i}{z_{\bar{e}}} \right)^2}$ .

Следовательно, активная мощность, потерянная в проводах линии электропередачи, равна

$$P = r_{\bar{e}} I^2 = \left( \frac{U}{z_{\bar{e}}} \right)^2 \frac{r_{\bar{e}}}{1 + 2 \frac{z_i}{z_{\bar{e}}} \cos \varphi_i - \varphi_{\bar{e}} + \left( \frac{z_i}{z_{\bar{e}}} \right)^2},$$

где  $z_{\bar{e}} = \sqrt{r_{\bar{e}}^2 + x_{\bar{e}}^2}$ ,  $z_i = \sqrt{r_i^2 + x_i^2}$ ,  $\varphi_{\bar{e}} = \arctg \frac{x_{\bar{e}}}{r_{\bar{e}}}$ ,  $\varphi_i = \arctg \frac{x_i}{r_i}$ .

При этом активное сопротивление ВЛ ( $r_{\bar{e}}$ ) является функцией от частоты  $f$ , так как с изменением частоты меняется эффективное сечение провода, а следовательно изменяется и сопротивление, так как глубина проникновения тока зависит от частоты. Поэтому

$$r_{\bar{e}} = \frac{\rho l}{S_{i \ y \delta}}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала провода;  $l$  – длина провода;

$S_{i \ y \delta} = \pi \cdot \frac{d^2}{4} - \pi \cdot \frac{d - 2\Delta}{4}$  – эффективное сечение провода [6]. Следовательно,

$$r_{\bar{e}} = \frac{\rho l}{\pi \cdot \frac{d^2}{4} - \pi \cdot \frac{d - 2\Delta}{4}}, \quad (5)$$

где  $d$  – диаметр провода;  $\Delta$  – глубина проникновения тока.

Задача нахождения распределения тока по сечению проводника, а следовательно и глубины его проникновения  $\Delta$ , решается с использованием уравнений Максвелла [7, 8]

$$\text{rot } \bar{B} = \mu \mu_0 \bar{j}, \quad (6)$$

$$\text{rot } \bar{E} = - \frac{\partial \bar{B}}{\partial t}. \quad (7)$$

Геометрия полупространства (рис. 2), занятого проводом, определена так:  $y \geq 0$ ,  $XZ$  – плоскость, на которой лежит поверхность провода, при этом ток течет вдоль оси  $X$ .

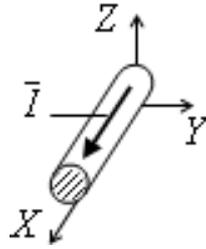


Рисунок 2 – Геометрия полупространства, занятого проводом [8]

По дифференциальному закону Ома [7]

$$\bar{j} = \gamma \bar{E}. \quad (8)$$

Подставив (8) в уравнение (6) и продифференцировав обе части по времени, получим (9)

$$\text{rot} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = \mu \mu_0 \gamma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}; \quad (9)$$

с учетом уравнения (7)

$$\text{rot rot} \bar{E} = \mu \mu_0 \gamma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}. \quad (10)$$

Поскольку  $\text{rot rot} \bar{E} = \text{grad div} \bar{E} - \nabla^2 \bar{E}$  и  $\text{div} \bar{E} = 0$  [7], окончательно имеем:

$$\nabla^2 \bar{E} = \mu \mu_0 \gamma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}. \quad (11)$$

С учетом выбранной выше геометрии запишем:  $j_x = j_x(y, t)$ ,  $j_y = j_z = 0$ ,  $E_x = E_x(y, t)$ ,  $E_y = E_z = 0$ . Тогда

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} = \mu \mu_0 \gamma \frac{\partial E_x}{\partial t}. \quad (12)$$

В уравнении (12) все величины являются гармоническими функциями от  $t$ , т.е.

$$E_x(y, t) = E_0(y) e^{i\omega t}. \quad (13)$$

Подставим (13) в дифференциальное уравнение (12), после сокращения обеих частей уравнения на  $e^{i\omega t}$  получим уравнение для амплитуды  $E_0(y)$  [7, 8]:

$$\frac{\partial^2 E_0}{\partial y^2} = i \gamma \mu \mu_0 \omega E_0. \quad (14)$$

Общее решение этого уравнения (14) имеет вид  $E_0 = A_1 e^{-ky} + A_2 e^{ky}$ . Учитывая, что [8]

$k = \sqrt{i \gamma \mu \mu_0 \omega} = \alpha (1+i)$ , где  $\alpha = \sqrt{\gamma \mu \mu_0 \omega / 2}$ , определим

$$E_0(y) = A_1 e^{-\alpha y} e^{-i\alpha y} + A_2 e^{\alpha y} e^{i\alpha y}. \quad (15)$$

Из анализа выражения (15) видно, что при удалении от поверхности провода  $y \rightarrow \infty$  второе слагаемое в выражении (15) неограниченно возрастает, что практически невозможно. Поэтому  $A_2 = 0$  и реально приемлемым решением является

только первое слагаемое. Следовательно, решение задачи с учетом гармонической зависимости  $E_x(y, t)$  имеет вид

$$E_x(y, t) = A_1 e^{-\alpha y} e^{j\omega t - \alpha y} . \quad (16)$$

Выполним следующие преобразования.

Из выражения (16) выделим его действительную часть и подставим полученное выражение в (8). В результате получим плотность тока в проводнике [8]:

$$j_x(y, t) = j_0 e^{-\alpha y} \cos \omega t - \alpha y . \quad (17)$$

Итак, при протекании тока параллельно границе раздела проводник – вакуум, его плотность  $\bar{j}$  убывает с глубиной проникновения в проводник по экспоненциальному закону

$$j(y) = j_0 \exp -y / \Delta , \quad (18)$$

где  $\Delta = 1/\alpha$ ;

$$. \quad (19)$$

$\Delta$  – величина, характеризующая глубину проникновения тока (толщина скин-слоя);  $j_0$  – плотность тока у поверхности проводника;  $\mu$  – магнитная проницаемость вещества проводника,  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\gamma$  – удельная проводимость;  $\rho$  – удельное сопротивление;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота переменного тока

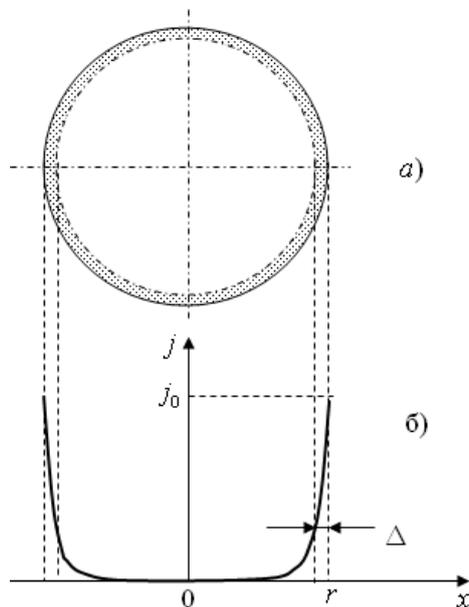


Рисунок 3 – Распределения тока по сечению проводника [8]

3: а) – поперечное сечение цилиндрического проводника радиуса  $r$  (заштрихован скин-слой); б) – распределение плотности переменного тока вдоль радиуса  $r$  проводника (для некоторой конкретной частоты переменного тока).

Итак, при построении ВП *выражение* (5) использовано для определения активного сопротивления провода в зависимости от частоты.

На рис. 4 приведена лицевая панель виртуального прибора.

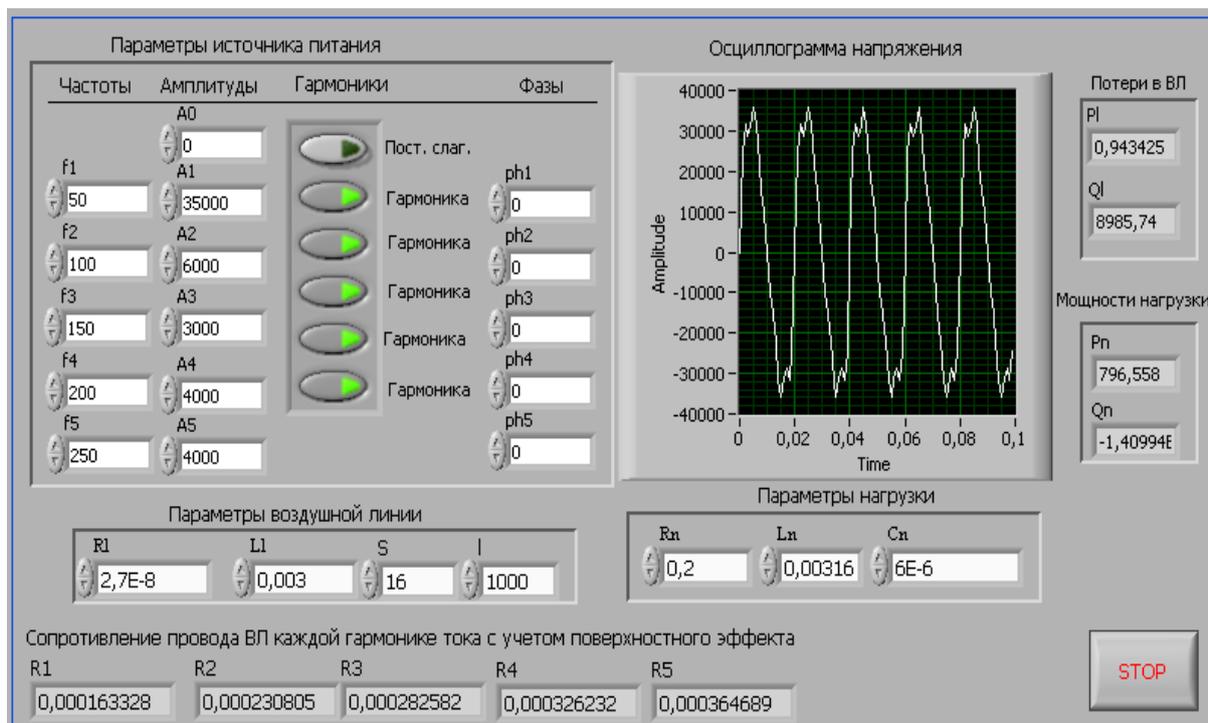


Рисунок 4.

### Заключение

Физические процессы в электроэнергетической системе, возникающие во время её эксплуатации, чрезвычайно разнообразны, и, как правило, на детерминированные процессы накладываются стохастические; вопросы влияния этих процессов, например, на потери электрической энергии, актуальны и требуют привлечения разнообразных средств исследования и проведения большого объема соответствующих экспериментов (численных или натурных).

Представленный в работе ВП позволяет проанализировать влияние искаженности синусоидального напряжения на дополнительные потери мощности в линиях электропередачи с учетом неравномерности распределения тока в проводе ВЛ при следующих исходных данных: – частоты гармоник напряжения, их амплитуды и начальные фазы (количество гармоник до 5-и); – параметры провода ВЛ (удельное сопротивление материала провода, индуктивность ВЛ, сечение провода и длина линии); – параметры нагрузки (сопротивление, индуктивность, емкость). Результатами работы ВП являются: – осциллограмма напряжения; потери в линии электропередачи; – потребляемая нагрузкой мощность; – сопротивления провода к каждой гармонике тока с учетом скин-эффекта.

### Литература

1. Пономаренко И.С. Влияние несинусоидальности напряжения на работу электронных счетчиков электроэнергии: Доклады научно-техн. конференции 2003 – М.:

- Изд-во НЦ ЭНАС. – С.56–66.
2. Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. и др. Качество электрической энергии в муниципальных сетях Московской области // *Промышленная энергетика.*-2002. – № 8. – С.42–48.
  3. Соколов В.С. Метрологическое оборудование и приборы контроля качества электрической энергии / В сб. информ.-методических мат. семинара "Метрологическое обеспечение электрических измерений в электроэнергетике". М.: ВНИИЭ, 1998. – С.15–18.
  4. Айдарова А.Р., Байбагысова Д.Ж., Сатаркулов К. Виртуальный прибор для исследования спектрального состава напряжения в воздушной линии при хаотическом режиме работы электрической сети и расчет дополнительных потерь / *Известия вузов Кыргызстана.* – 2016.– № 6.– С. 20–29.
  5. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники, ч. I, Линейные электрические цепи, изд. 4-е.- М.: Энергия, 1970.– 592 с. с илл.
  6. Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: Электронный сборник статей по материалам XLII студенческой международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Изд. АНС «СибАК». – 2016. – № 5 (41)/ [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: [http://www.sibac.info/archive/Technic/5\(41\).pdf](http://www.sibac.info/archive/Technic/5(41).pdf).
  7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 263 с.: ил.
  8. Буханов В.М., Глушкова Т.М., Матюнин А.В., Салецкий А.М., Харабадзе Д.Э. СКИН – ЭФФЕКТ. – М.: МГУ, 2011. – 11 с.
  9. Айдарова А.Р., Байбагызова Д.Ж., Усубалиева Г.К. Исследование влияния различных факторов на величину нагрузочных потерь энергии в элементах электрической сети // *Проблемы автоматизации и управления.*– 2015. – №1(28).– С. 61–66.
  10. Айдарова А.Р., Байбагызова Д.Ж., Кадиева А. Решение задач моделирования при исследовании потерь в элементах электрической сети с применением LabView // *Проблемы автоматизации и управления.* – 2015.– №1(28).– С. 67–71.
  11. Ниязова Г.Н., Айдарова А.Р., Яблочников А.М. Решение некоторых задач электроэнергетики с помощью компьютерных технологий // *Проблемы автоматизации и управления.* – 2015. – №2(29). – С. 75–81.

*А.М. Яблочников, аспирант, art.kazsccp@mail.ru*

*Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек.*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА МИКРОГЭС С ПОМОЩЬЮ ВИРТУАЛЬНОГО ПРИБОРА**

Рассмотрено применение виртуального прибора (ВП) в среде NI – LabVIEW для изучения динамического поведения генератора микроГЭС вблизи границ области его устойчивости. Возможности ВП продемонстрированы на конкретном примере. Установлено, что вблизи границы устойчивости генератора микроГЭС возникает хаотический режим его работы. Такой режим из-за своей непредсказуемости – явление недопустимое.

**Ключевые слова:** виртуальный прибор; генератор; микроГЭС; динамический хаос; моделирование; устойчивость; синхронная машина.

### **Введение**

Исследование динамических (переходных) режимов работы микроГЭС обусловлено необходимостью учета особенностей их конструкции и эксплуатации. Рассмотрим некоторые из этих особенностей [1].

Во-первых, весьма вероятно проведение коммутации нагрузок, мощность которых сравнима с номинальной мощностью станции, поскольку микроГЭС является автономной системой электроснабжения небольшой мощности (от единиц до 100 кВт).

Во-вторых, особо следует отметить, что в переходных режимах во время пуска асинхронных двигателей от микроГЭС, когда мощность привода соизмерима с мощностями источника питания и нагрузки, пусковые токи достигают 5–7 кратных значений от номинального при большой индуктивной составляющей. Поэтому электромагнитные и электромеханические процессы в такой системе электроснабжения протекают одновременно, оказывая взаимное влияние друг на друга.

**Постановка задачи и предлагаемый способ решения.** С учетом сказанного можно заключить, что исследование динамических (переходных) режимов работы микроГЭС необходимо для изучения динамического поведения генератора вблизи границ области его устойчивости и лучше всего это выполнить путем моделирования режима его работы.

Универсальным методом моделирования является имитационное моделирование с использованием различных сред.

Известно, что для решения задач электроэнергетики и электроники наиболее подходящими являются среды MatLab, Simulink, SimPowerSystem, LabView [2, 3, 4].

LabView можно отнести к последним программным продуктам, которые содержат все необходимые компоненты, позволяющие вставлять и отлаживать специализированные программные продукты и сопрягаться с компьютерами.

В данной работе использованы математические возможности среды NI LabVIEW [5, 6], поставлена задача адаптировать ВП, разработанный ранее К. Сатаркуловым [7] для численного исследования и моделирования режимов работы генератора микроГЭС вблизи границ области его устойчивости.

### Численное решение нелинейного уравнения генератора

Уравнение движения генератора, работающего на систему неограниченной мощности (СНМ), и его электрическая мощность имеют вид [8]:

$$\frac{\tau_J}{\omega_{ном}} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{2H}{\omega_{ном}} \frac{d\omega}{dt} = P_{\tau} - P_{эл}, \quad (1)$$

$$P_{эл} = P_m \sin \delta, \quad (2)$$

где,  $\tau_J = 2H$ , сек.;  $H$  – постоянная инерции машины;  $\omega$  – угловая частота и её номинальное значение  $\omega_{ном}$ , рад/с;  $d^2 \delta / dt^2$  – угловое ускорение ( $рад/c^2$ );  $P_{\delta}$ ,  $P_{\delta\epsilon}$  – соответственно мощность первичного двигателя и электромагнитная мощность генератора в относительных единицах.

Уравнение движения (1) в исходном режиме, записанное для конкретного синхронного генератора, работающего на СНМ через трансформатор и двухцепную линию электропередачи, имеет при  $P_{\delta} = 0,8$ ,  $P_m = 2,222$  следующий вид [8]:

$$\frac{10}{377} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = 0,8 - 2,222 \sin \delta. \quad (3)$$

Исходное значение угла  $\delta_0 = 21,09^\circ = 0,367 рад$ , начальное ускорение ротора

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = 37,7 \cdot 0,8 - (2,222 \sin 0,367) = 0,102 \frac{рад}{c^2}. \quad (4)$$

Уравнение (3) получено из [8] для системы, схема которой приведена на рис.1

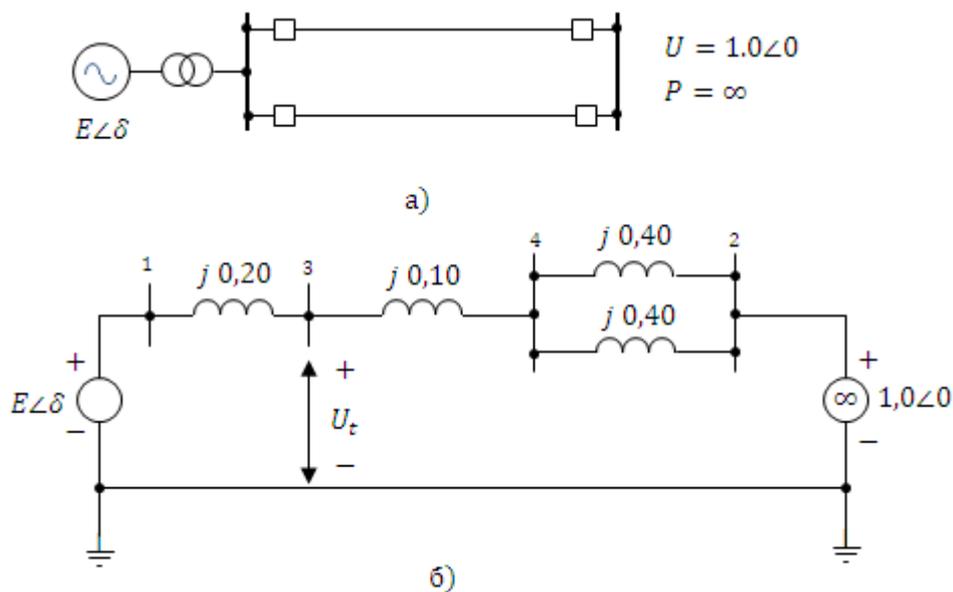


Рисунок 1: а) – схема системы; б) – схема замещения в исходном режиме [8]

Напряжение на шинах системы  $U = 1$ ; реактивное переходное сопротивление генератора по продольной оси – 0,2; реактивное сопротивление трансформатора – 0,1; реак-

тивное сопротивление каждой из двух цепей линии электропередачи – 0,4. Здесь все величины отнесены к базовому значению номинальной полной мощности генератора. В исходном режиме машина выдавала активную мощность 0,8, напряжение на выходе составляло 1,05. Постоянная инерции машины  $H = 5 \text{ МДж} / \text{МВ} * \text{А} = 5 \text{ с}$ . Активное сопротивление линий при эксперименте не учитывалось.

Уравнения (3, 4) использованы для демонстрации динамического поведения генератора вблизи границ области его устойчивости с помощью среды LabVIEW.

Произведем замену переменных состояния  $\delta$  и  $d\delta/dt = \omega t$  на  $x_1$  и  $x_2$ , соответственно, уравнение движения (1) представим двумя дифференциальными уравнениями первого порядка

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 - \omega_{ном}, \\ \dot{x}_2 &= -a \sin x_1 + b \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где  $a = P_m \omega_{ном} / \tau_J = P_m \omega_{ном} / 2H$ ;  $b = P_T \omega_{ном} / \tau_J = P_T \omega_{ном} / 2H$ ;  $\omega_{ном} = const$ .

При составлении блок-диаграммы поставленной задачи в среде LabVIEW необходимо помнить, что  $\omega t = d\delta/dt + \omega_{ном}$ .

При использовании стандартных функций LabVIEW для решения системы уравнений следует представить правую часть дифференциального уравнения (5) в виде массива текстовых констант. Это затрудняет внесение изменений в численные значения отдельных параметров, что необходимо при исследовании влияния на динамическую устойчивость генератора, например, изменения электрической мощности. Поэтому в данной работе использован решатель уравнения, изложенный в работе [9]. В [7] этот алгоритм реализован как виртуальный прибор в среде моделирования LabVIEW. Интерфейс виртуального прибора показан на рис. 2, где на поле 1 – размещены элементы входных параметров моделирования (длительность моделирования и шаг интегрирования – в секундах, исходное значение угла ротора в радианах, механическая и электрическая мощности – в относительных единицах, угловая частота – в Герцах).

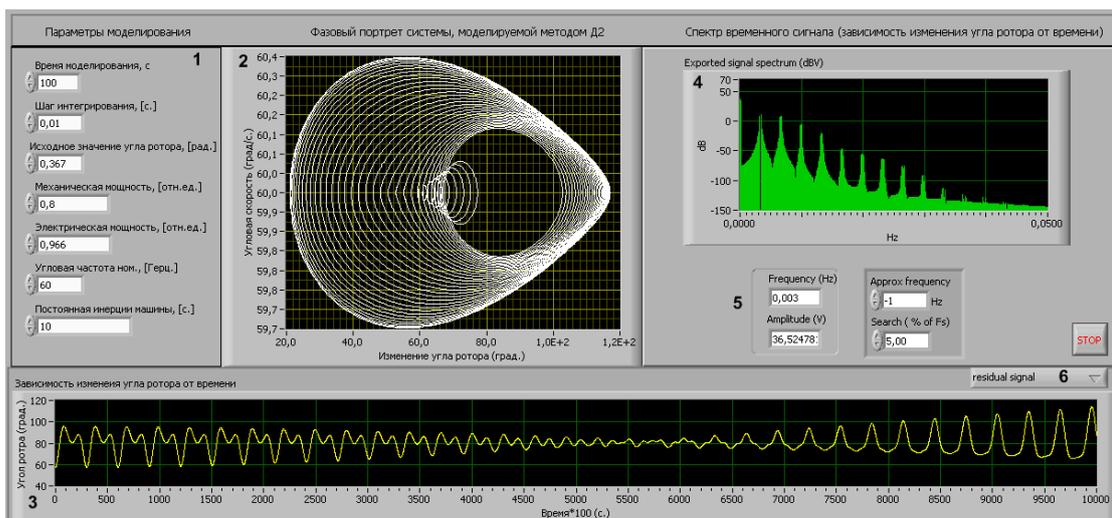


Рисунок 2 – Лицевая панель ВП для исследования динамической устойчивости генератора и хаотического его поведения; поле 2 – (XY Graph) графический индикатор для отображения фазового портрета (по оси X – изменение угла ротора в градусах; по

оси Y – угловая скорость ротора в рад/с); поле 3 – виртуальный осциллограф для отображения зависимости угла ротора от времени; поле 4 – графический индикатор для отображения спектра входного сигнала; поле 5 – отображения значений частоты и амплитуды найденного гармонического колебания: при нажатии кнопки б выводятся на экран варианты отображаемых выходных сигналов, исходный сигнал, синусоидальная составляющая исходного сигнала и остаточная составляющая исходного сигнала.

Блок-диаграмма ВП представлена на рис. 3.

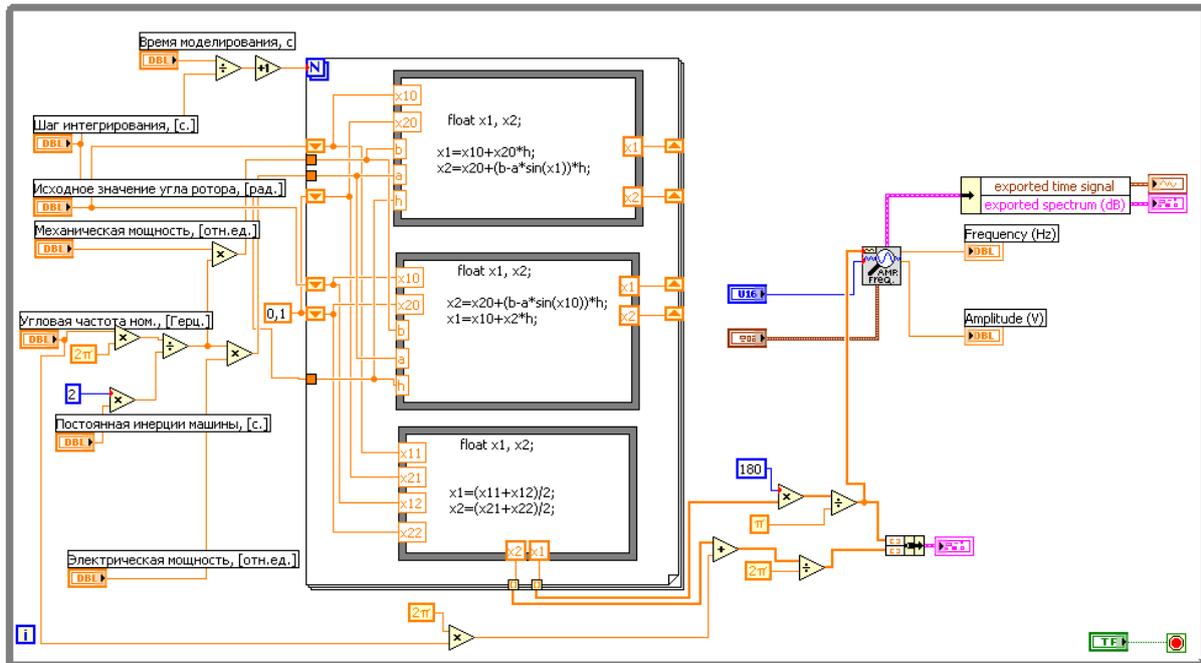


Рисунок 3 – Блок-диаграмма ВП [7]

Из множества функций LabVIEW, которые использованы при разработке ВП, отметим только функцию измерения параметров осциллограмм «Extract Single Tone Information» («Извлечь информацию о единственном гармоническом колебании»).

Благодаря функции Extract Single Tone Information с помощью ВП можно выделить из исходного движения ротора его составляющие, т.е. единственное гармоническое колебание с наибольшей амплитудой, и остаточный сигнал, или найти определенный диапазон частот, амплитуду и фазу этого колебания.

Рассмотрим изменение угла ротора во времени  $\delta t$  и фазовый портрет дискретной системы [7] на примере уравнения движения машины (2), смоделированного численным методом второго порядка с диагональной коррекцией (ДК), при следующих исходных параметрах: угол ротора  $\delta_0 = 21,09^\circ = 0,367 \text{ рад}$ , его начальное ускорение  $0,102 \text{ рад} / \text{с}^2$  (4); механическая мощность  $P_0 = 0,8$ ; электрическая мощность  $P_m = 2,222$ ; номинальная угловая частота  $\omega_{ном} = 377 \text{ рад} / \text{с}$ ; постоянная инерции машины  $H = 5 \text{ с}$ . Расчеты проведены методом ДК с шагом интегрирования по времени, равным 0,0001.

Таким образом, представленный виртуальный прибор позволяет моделировать работу генератора и анализировать влияние всех параметров модели на режим его работы.

**Результаты численного эксперимента** вынесены в таб. 1 и 2. В первой строке каждого блока представлен график изменения угла ротора  $\delta t$  по времени, во второй и третьей строках его составляющие, т.е. единственные гармонические колебания с наибольшей амплитудой и остаточные составляющие. Эти данные получены благодаря использованию в виртуальном приборе функции Extract Single Tone Information («Извлечь информацию о единственном гармоническом колебании»).

В правой части таблицы содержатся фазовые портреты и спектры зависимости  $\delta t$ . На фазовых портретах представлены фазовые траектории, где координаты каждой точки траектории показывают значения угла  $\delta$  ротора в градусах (ось абсцисс) и его угловой скорости в рад/с (ось ординат) в текущий момент времени  $t$ .

В табл. 1 представлены результаты численного эксперимента при моделировании динамического поведения генератора вблизи границ области его устойчивости. Спектр колебаний имеет не дискретный характер, а становится непрерывным широкополосным.

Вблизи границ области устойчивости возникают хаотические колебания, и в фазовом пространстве траектории развиваются непрерывно во времени, без пересечений, и постепенно заполняют некоторую его область таким образом, что любую сколь угодно малую зону фазового пространства пересекает бесконечно большое количество отрезков траектории. Это и создает в каждой зоне случайную ситуацию – хаос [9].

Как видно, спектр частот переходит из дискретного в непрерывный, а это свидетельствует о присутствии большого количества частот, причем некоторые из них могут совпадать с собственной частотой механического колебания вала генератора. Подобное совпадение частот может возбудить резонансное колебание, крайне нежелательное для генератора.

Таблица 1

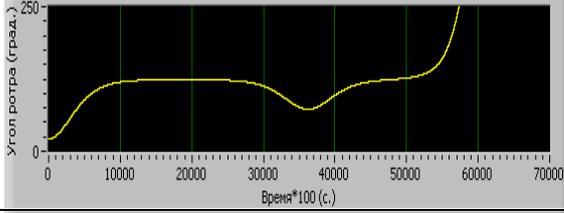
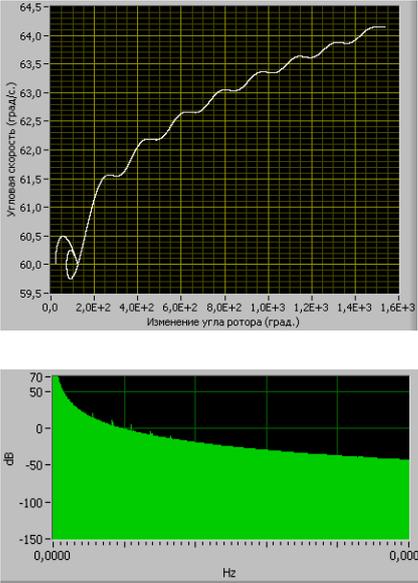
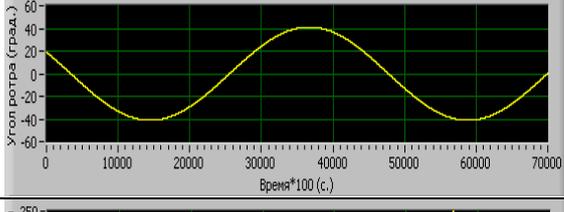
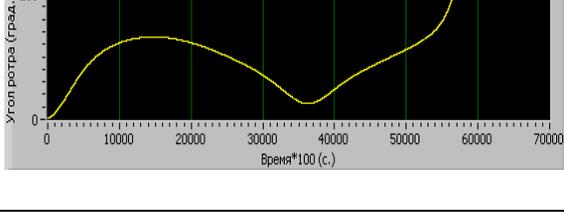
Графическое представление режима работы генератора при  $P_0 = 0,8$ ;  $P_m = 0,9633518548$

	Закон изменения угла ротора во времени (1) и его составляющие (2, 3)	Фазовый портрет и спектр
1 $\delta t = \delta_1 t + \delta_2 t$		
2 $\delta_1 t$		
3 $\delta_2 t$		

В таблице 2 представлен случай наступления потери устойчивости работы генератора.

Таблица 2

Графическое представление режима работы генератора при  $P_0 = 0,8$ ;  $P_m = 0,9633518547$

	Закон изменения угла ротора во времени (1) и его составляющие (2, 3)	Фазовый портрет и спектр
1 $\delta(t) = \delta_1(t) + \delta_2(t)$		
2 $\delta_2(t)$		
3 $\delta_2(t)$		

### Заключение

Представленные результаты исследования дают картину перестройки динамического поведения модели (3) генератора при изменении параметра  $P_m$ . При уменьшении этого параметра от исходного значения  $P_m = 2,222$  и при приближении к значению  $P_0 = 0,8$  наблюдаются явления сложной динамики, связанные с возникновением различных аттракторов (табл. 1 и табл. 2). Хаотическому аттрактору (табл. 1) соответствует такой режим, когда  $\delta t$  изменяется стохастично, а спектр состоит из множества узких линий, соответствующих самим колебаниям, и широкой подложки, отвечающей «случайным» колебаниям. В таком режиме возможно возникновение высших гармоник тока и напряжения. Выяснено, что в системе потеря устойчивости режима (табл. 2) наблюдается при  $P_m = 0,9633518547$ .

Важно установление существования областей значений параметров, при которых система демонстрирует хаотические аттракторы различного типа.

Хаотический режим затрудняет работу синхронных генераторов, поскольку имеет широкополосный спектр частот и возможно индуцирование гармоник тока и напряжения, опасных для функционирования генераторов.

**Литература**

1. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. – Томск: ТПУ, 2001. – 104 с.
2. Гельфанд А.М. Создание автоматизированной системы технологического управления процессами функционирования и эксплуатации электрических сетей ЕНЭС // Энерго-Инфо – 2009. – №1(60). – С. 13–23.
3. Грищенко В.Н. Методы и средства компонентного программирования // Кибернетика и системный анализ. – 2003. – №1. – С. 39–55.
4. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с.
5. Севостьянов А.О., Каратаев В.В. Применение среды LabVIEW для исследования переходных процессов в нелинейных цепях с кусочно-линейными характеристиками. URL: <http://do.gendocs.ru/docs/index-239552.html> (дата обращения: 03.05.2019).
6. Айдарова А.Р., Байбагысова Д.Ж., Кадиева А. Решение задач моделирования при исследовании потерь в элементах электрической сети с применением LabVIEW // Проблемы автоматизации и управления // Матер. междунар. конф. «Проблемы управления и информационных технологий», 2015.– С. 67–71.
7. Imanakunova Zh.S., Satarkulov K., Baibagysova D.Zh., Kadieva A.K. Using LabView environment for the demonstration of generator dynamic behavior // E3S Web of Conferences 58, 03011 (2018) 5 p. URL: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/33/e3sconf\\_rses2018\\_03011/e3sconf\\_rses2018\\_03011.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/33/e3sconf_rses2018_03011/e3sconf_rses2018_03011.html) (дата обращения:03.05.2019).
8. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость; пер. с англ. Под ред. Я.Н. Лугинского. – М.: Энергия, 1980. – 568 с.
9. Бутусов Д.Н., Островский В.Ю., Красильников А.В. Моделирование нелинейных динамических систем параллельными численными методами интегрирования // Фундаментальные исследования (технические науки). – 2014.– №12. – С. 1873–1877.

**И.Р. Урусова**, e-mail [moon4ik\\_29@mail.ru](mailto:moon4ik_29@mail.ru),  
Институт фундаментальных наук при КНУ им. Ж.Баласагына Кыргызская  
Республика,

## ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ШУНТИРОВАНИЯ ВИТКОВ СПИРАЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ ВИНТОВОЙ ФОРМЫ

Выполнено численное моделирование открытой электрической дуги постоянного тока во внешнем однородном аксиальном магнитном поле. Установлено, что винтовая форма открытой дуги не является постоянной во времени и периодически разрушается. Выявлен новый режим разрушения регулярной структуры в результате шунтирования участка дуги между витками спирали.

**Ключевые слова:** электрическая дуга; винтовая форма электрической дуги; внешнее аксиальное магнитное поле; низкотемпературная плазма.

**Введение.** Электрическая дуга, горящая во внешних магнитных полях, широко используется в науке и технике [1, 2]. Известно, что при воздействии внешнего аксиального магнитного поля протяженная дуга длиной более нескольких сантиметров теряет устойчивость и отклоняется от цилиндрической симметрии. Как результат, дуговой столб может трансформироваться в винтовую форму [3, 4]. Целью настоящей работы является проведение численного расчета открытой электрической дуги постоянного тока, горящей во внешнем аксиальном магнитном поле, и анализ физических процессов в столбе электрической дуги.

**Математическая модель.** Рассматривается открытая электрическая дуга постоянного тока  $I$  длиной  $L$  в аргоне при атмосферном давлении и однородном внешнем аксиальном магнитном поле  $H^{Ext}$ . Нестационарная трехмерная система МГД-уравнений электрической дуги в приближении модели частичного локального термодинамического равновесия плазмы может быть записана следующими уравнениями [5-8]:

уравнение непрерывности газа тяжелых частиц

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V}) = 0, \quad (1)$$

уравнение непрерывности газа электронов

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} + \text{div}(N_e \mathbf{V}_e) = R_e, \quad (2)$$

уравнение баланса энергии газа электронов

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{3}{2} k T_e N_e \right) + \text{div} \left( \frac{5}{2} k T_e N_e \mathbf{V}_e \right) = \text{div}(\lambda_e \text{grad} T_e) + \mathbf{j}^2 / \sigma - \psi - B(T_e - T) - U_i R_e, \quad (3)$$

уравнение баланса энергии газа тяжелых частиц

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{3}{2} k T (N_i + N_a) \right) + \text{div} \left( \frac{5}{2} k T (N_i + N_a) \mathbf{V} \right) = [\text{div}(\lambda \text{grad} T) + B(T_e - T)], \quad (4)$$

уравнение баланса импульса газа вдоль осей координат  $x, y, z$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V} u) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu_0 (\mathbf{j} \times \mathbf{H})_x + s_x + (\rho - \rho_\infty) \mathbf{g}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{V}v) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} v) - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu_0(\mathbf{j} \times \mathbf{H})_y + s_y, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{V}w) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} w) - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu_0(\mathbf{j} \times \mathbf{H})_z + s_z, \quad (7)$$

уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0, \quad \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j}, \quad \operatorname{div} \mathbf{H} = 0, \quad (8)$$

закон Ома в обобщенной форме

$$\mu_0 (\mathbf{V}_e \times \mathbf{H}) + \mathbf{E} = \mathbf{j} / \sigma + (\mu_0 (\mathbf{j} \times \mathbf{H}) - \operatorname{grad} P_e) / q_e N_e, \quad (9)$$

закон Дальтона

$$P/kT = N_i + N_a + N_e T_e / T. \quad (10)$$

Принято, что дуговая плазма аргона атмосферного давления является однократно ионизованной, квазинейтральной, течение ламинарное, дозвуковое, излучение объемное; вязкой диссипацией энергии пренебрегается, приэлектродные процессы не рассматриваются.

В уравнениях (1–10) приняты следующие обозначения:  $t$  – время,  $\rho$ ,  $\lambda_e$ ,  $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $\psi$  – соответственно плотность газа, теплопроводность электронного газа и газа тяжелых частиц, вязкость, электропроводность, излучение;  $m$  – масса атома плазмообразующего газа;  $N_i$ ,  $N_a$ ,  $N_e$  – концентрации ионов, атомов и электронов соответственно;  $R_e = N_e (N_a K_i - N_e N_i K_r)$  – скорость генерации электронов, где  $K_i$ ,  $K_r$  – константы ударной ионизации и трехчастичной рекомбинации соответственно;  $U_i$  – потенциал ионизации плазмообразующего газа;  $P_e = N_e k T_e$  – парциальное давление электронов,  $k$  – постоянная Больцмана;  $B = 3m_e / mk_B v_e N_e$  – коэффициент обмена энергией между электронами и тяжелыми частицами при упругих столкновениях,  $m_e$  – масса электрона,  $v_e$  – частота столкновений;  $\mathbf{g}$  – вектор ускорения свободного падения;  $q_e$  – элементарный заряд;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{H}$  – соответственно векторы скорости, напряженности электрического поля, плотности электрического тока, напряженности собственного магнитного поля дуги;  $T$ ,  $T_e$  – температура тяжелых частиц и электронов;  $P$  – давление;  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – соответственно компоненты вектора скорости в направлениях осей координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ;  $\mathbf{V}_d$ ,  $\mathbf{V}_t$ ,  $\mathbf{V}_a$  – векторы скоростей дрейфа электронов, термо- и амбиполярной диффузии, определяемые по формулам:  $\mathbf{V}_d = \mathbf{j} / (q_e N_e)$ ,  $\mathbf{V}_t = -D_a / T_e \operatorname{grad} T_e$ ,  $\mathbf{V}_a = -D_a / N_e \operatorname{grad} N_e$ , где  $D_a$  – коэффициент амбиполярной диффузии;  $\mathbf{V}_e = \mathbf{V} + \mathbf{V}_d + \mathbf{V}_t + \mathbf{V}_a$  – суммарная скорость электронов;  $s_x$ ,  $s_y$ ,  $s_z$  – дополнительные к  $\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} u)$ ,  $\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} v)$ ,  $\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} w)$  вязкие слагаемые.

Коэффициенты переноса и теплофизические свойства неравновесной аргоновой плазмы рассчитываются в соответствии с методикой [6].

Электромагнитная часть задачи решается в переменных  $\varphi$ ,  $\mathbf{A}$ , где  $\varphi$  – скалярный потенциал электрического поля  $\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi$ ,  $\mathbf{A}$  – векторный потенциал магнитного поля, связанный с  $\mathbf{H}$  соотношением  $\operatorname{rot} \mathbf{A} = \mathbf{H}$ . Используя обобщенный закон Ома, условие сохранения электрического тока  $\operatorname{div} \mathbf{j} = 0$  и уравнения Максвелла, приведем уравнения для расчета  $\varphi$  и компонент  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$  к следующему виду:

$$\operatorname{div}(\sigma \operatorname{grad} \varphi) = \operatorname{div}[\sigma \mu_0 (\mathbf{V}_e \times \mathbf{H}) - \sigma (\mu_0 \mathbf{j} \times \mathbf{H} - \operatorname{grad} P_e) / q_e N_e], \quad (11)$$

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad} A_x) = -j_x, \quad \operatorname{div}(\operatorname{grad} A_y) = -j_y, \quad \operatorname{div}(\operatorname{grad} A_z) = -j_z. \quad (12)$$

Температура неплавящихся электродов определяется из уравнения теплопроводности.

**Методика численного решения уравнений.** Согласно методике [9] систему уравнений (1–12) путём простых преобразований можно представить в виде обобщенного дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial \alpha \rho \Phi}{\partial t} + \frac{\partial \beta \rho u \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \beta \rho v \Phi}{\partial y} + \frac{\partial \beta \rho w \Phi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \gamma \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + \delta, \quad (13)$$

где  $\Phi$  – одна из неизвестных ( $N_e, T_e, T, u, v, w, \varphi, A_x, A_y, A_z$ ). Для каждой переменной  $\Phi$  имеются свои коэффициенты  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ .

Численное решение уравнения (13) проводим методом контрольного объема на основе конечных разностей. Используется неявная разностная схема, неизвестные переменные (скорость и давление) рассчитываются по алгоритму SIMPLE'R [9]. Полученная система алгебраических уравнений решена итерационным методом Зейделя–Гаусса с использованием нижней релаксации.

Для рассчитываемых переменных постановка граничных условий проведена по периметру расчетной области (рис. 1). Начальные условия задаются в некоторый условный момент времени  $t = 0$ . На внешних границах прямоугольной расчетной области в сечениях  $ABCD, EFGH, ABGF, DCHE, CBGH, ADEF$  (см. рис.1) значения температуры и концентрации электронов равны значениям температуры  $T_e^{\min}$  и концентрации  $N_e^{\min}$  «холодного» не ионизованного газа:  $T_e = T_e^{\min} = 3$  кК,  $N_e = N_e^{\min} = 10^{17} \text{ м}^{-3}$ . Температура тяжелых частиц принята равной температуре холодного газа  $T = 300$  К.

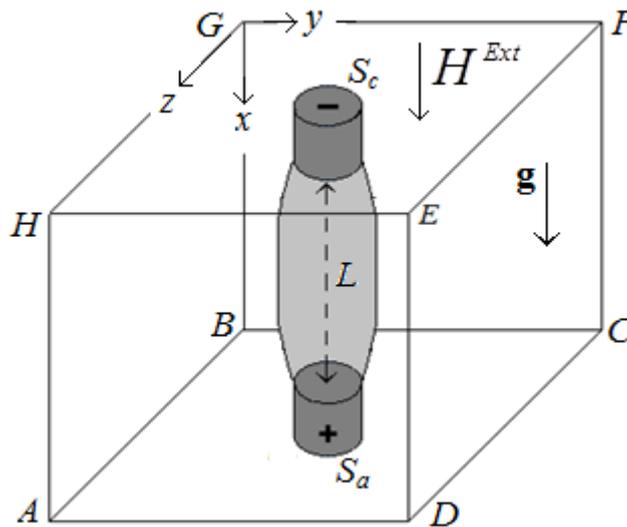


Рисунок 1 – Схема расчетной области в декартовых координатах  $x, y, z$ . Пунктирная линия - - - центральная ось дуги.

При отсутствии электрического тока потенциал электрического поля  $\varphi$  рассчитывается из условия  $\partial \varphi / \partial \mathbf{n} = 0$ , где  $\mathbf{n}$  – нормаль к поверхности границы. На внешней токоведущей торцевой поверхности катода  $S_c$  и анода  $S_a$  потенциал электрического поля  $\varphi$  рассчитывается из условия протекания электрического тока  $I$  по нормали к поверхности. Такое же условие для  $\varphi$  используется на границе «катод–плазма». Вне катода и анода электрический ток отсутствует. Отметим, что в настоящей работе за направление электрического тока  $I$  выбрано направление движения электронов от катода (–) к аноду (+).

Компоненты векторного потенциала  $A_x, A_y, A_z$  магнитного поля определяются из условия равенства нулю первой производной  $\partial \mathbf{A} / \partial \mathbf{n} = 0$  по нормали к границе.

Давление  $P$  полагается равным относительному значению  $P = 1$  Па. Компоненты скорости  $u, v, w$  определяются из условия равенства нулю  $\partial^2 \mathbf{V} / \partial \mathbf{n}^2 = 0$ .

В начальный момент между электродами имеется высокотемпературная ( $T = 9$  кК) зона с неподвижным газом в форме цилиндра с диаметром, равным диаметру электродов.

Для моделирования винтовой формы дуги во внешнем аксиальном магнитном поле обычно используется схемный аналог флуктуаций температуры электронов [10, 11].

**Анализ результатов расчета.** Выполнен расчет открытой электрической дуги с силой тока  $I = 40$  А и межэлектродным расстоянием  $L = 50$  мм, горящей в однородном внешнем аксиальном магнитном поле с  $H^{Ext} = 5$  кА/м (см. рис.1). В модели принято, что дуга горит между электродами из графита радиусом  $r = 0,5$  мм с торцевой токоведущей поверхностью. Сеточный шаг во всех направлениях по координатам  $x, y, z$  равен 0.5 мм, временной шаг равен  $\tau = 10^{-4}$  с.

До выхода расчетных характеристик на стационарное распределение численный расчет выполняется в отсутствие внешнего магнитного поля, т.е. полагается  $H^{Ext} = 0$ . Затем, после момента времени  $t = 30$  мс, задается внешнее аксиальное магнитное поле с  $H^{Ext} = 5$  кА/м.

При этом происходит эволюция формы дуги, как показано на рис. 2. Форма дуги является 3D-поверхностью, ограниченной изотермой  $T = 3$  кК, направление обзора столба дуги перпендикулярно плоскости  $x-z$ , отсчет в направлении оси  $x$  ведется от поверхности катода (-), отсчет в направлениях осей  $y, z$  ведется от центральной оси.

Как видно из рис.2, пространственная винтовая форма дуги меняется во времени. Так, например, на временных интервалах  $\Delta t \approx 87 \div 90$  мс и  $\Delta t \approx 91 \div 95$  мс происходит формирование винтовой формы, имеющей два витка спирали. Однако, в дальнейшем, в моменты  $t \approx 91$  и 96 мс происходит разрушение ее регулярной винтовой структуры. Это вызвано тем, что участки дуги со стороны катода и анода вращаются в противоположных направлениях. Вследствие этого периодически нарушается гладкое сопряжение между участками дуги со стороны электродов и средней части столба.

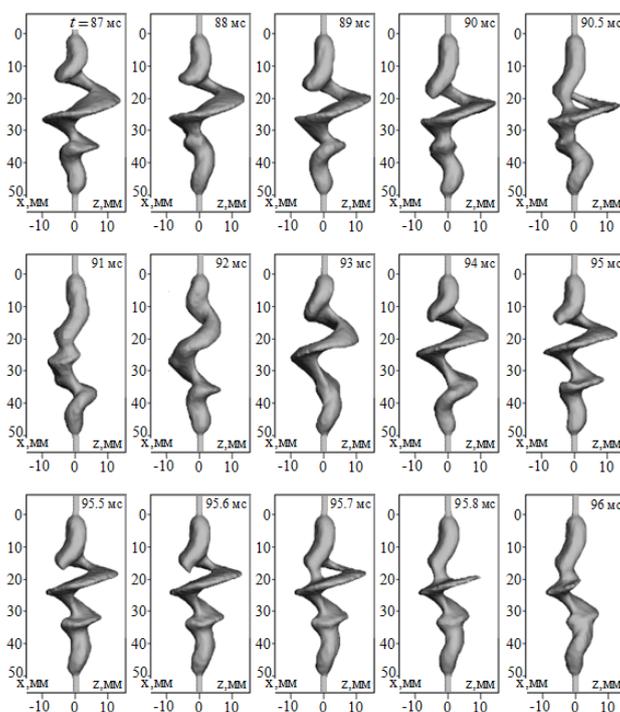


Рисунок 2 – Эволюция формы столба дуги на интервале времени  $\Delta t = 87 \div 96$  мс.

Как это видно из рис.2 при  $t \approx 90,5, 95,7$  мс между витком спирали винтовой дуги наблюдается шунтирование. Поясним, что на рис.2 на интервале времени  $\Delta t = 95,5 -$

95.8 мс для большей наглядности эволюция столба дуги показана с временным шагом 0.1 мс.

По-видимому, процесс шунтирования имеет гидродинамическую природу и обусловлен конвективным теплопереносом потоками плазмы. Шунтирование витка приводит к его охлаждению с последующим исчезновением, так как в этом витке прекращается течение электрического тока. После исчезновения витка спирали происходит своеобразное «выпрямление» участка столба дуги. В последующие моменты времени опять происходит формирование винтовой структуры столба дуги.

**Заключение.** При математическом моделировании расчета открытого электродугового разряда при наличии внешнего аксиального магнитного поля, установлено, что винтовая пространственная форма дуги не является неизменной во времени. Наблюдается периодическое разрушение винтовой формы столба дуги с последующим восстановлением.

Обнаружен новый режим горения, при котором происходит шунтирование соседних витков спирали между собой. По-видимому, шунтирование имеет гидродинамическую природу, обусловленную конвективным теплопереносом потоками электродуговой плазмы.

### *Литература*

1. Лебедев А.Д., Урюков Б.А., Энгельшт В.С. и др. Низкотемпературная плазма. Т. 7. Сильноточный дуговой разряд в магнитном поле. – Новосибирск – Наука, – 1992. – 267 с.
2. Чередниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электро-технологические установки. – Новосибирск НГТУ. – 2005. – 508 с.
3. Меккер Г. Причины движения и смещения дуги // ТИИЭР. – 1971.Т. 59. – № 4. – С.4–14.
4. Ментель Ю. Магнитная неустойчивость электрической дуги. В кн. Теория электр. дуги в условиях вынужденного теплообмена. – Новосибирск: Наука. – 1977. – 182 с.
5. Урусова И.Р. Расчет короткой электрической дуги во внешнем аксиальном магнитном поле, // Вестник Евразийского Национального Университета. – Астана, 2011, № 6, – С. 104 –110.
6. Урусов Р.М., Урусова И.Р. Нестационарная трехмерная модель электрической дуги. // Теплофизика и аэромеханика, – СО РАН, Новосибирск. – 2014, № 1, – С. 121 – 134.
7. Урусов Р.М., Урусова И.Р. Численное моделирование винтовой формы электрической дуги во внешнем аксиальном магнитном поле // ТВТ, 2017. Т. 55. – № 5. – С. 661 – 670.
8. Энгельшт В.С., Гурович В.Ц., Десятков Г.А. и др. Низкотемпературная плазма. Т. 1. Теория столба электрической дуги. – Новосибирск: Наука, 1990. – 374 с.
9. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 146 с.
10. I.R. Urusova, T.E. Urusova Evolution of space open electric arc burning in the external axial magnetic field // Physics of Plasmas. – 2018. – Vol. 25, N. 6. – P.101-110.
11. Урусова И.Р. Особенности гидродинамики и конвективного теплопереноса в открытой электрической дуге во внешнем аксиальном магнитном поле // Известия КГТУ им.И.Раззакова, – Бишкек, – 2018, №2(46). – С. 322–331.

**Т.П. Самохвалова**

*Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР,*

**А.К. Керимбеков, О.К. Таирова**

*Кыргызско-Российский Славянский университет*

## ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ В МОДЕЛИ УПРАВЛЯЕМОГО ПРОЦЕССА

Построен алгоритм приближенно-оптимального синтезирующего управления для линейной системы с сосредоточенными параметрами с последствием. Моделью процесса является интегро-дифференциальное уравнение типа V. Volterra. Алгоритм основан на методе динамического программирования Р. Беллмана.

Ключевые слова: оптимальное управление; обратная связь; динамическое программирование; интегро-дифференциальное уравнение.

**Введение.** Математические модели с интегро-дифференциальными уравнениями рассматривались в работах [1–4 и др.], в теории упругости при наличии последствия, в расчетах механических, электромагнитных и тепловых процессов, в биологии и экологии. Задачи оптимального управления с интегро-дифференциальными моделями были сформулированы в работах [5–7 и др.]. Численная реализация разработанных алгоритмов управления с моделями в частных производных была затруднена, применялись методы конечно-разностной аппроксимации. Метод прямых позволяет получить модели в обыкновенных производных, но их размерность также приводит к вычислительным трудностям.

### 1. Постановка задачи

В данной работе рассмотрена задача оптимального управления с одномерной моделью в обыкновенных производных

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + \lambda \int_0^t G(t, \tau)x(\tau)d\tau + Bu(t), \quad x(0) = x_0, \quad t \in [0; T]. \quad (1)$$

Здесь  $A, B, \lambda, x_0, T$  – заданные постоянные;  $G(t, \tau) \in C(D)$ ,  $D = [0; T] \times [0; T]$  – заданная функция;  $u(t)$  – управление из множества  $U$  допустимых управлений.

Введем минимизируемый критерий качества

$$J = \gamma_1 \int_0^T \left[ Qx^2(t) + \lambda Q_1 \left( \int_0^t G(t, \tau)x(\tau)d\tau \right)^2 \right] dt + \\ + \gamma_2 \left[ Fx^2(T) + \lambda F_1 \left( \int_0^T G(T, \tau)x(\tau)d\tau \right)^2 \right] + \beta \int_0^T u^2(t)dt. \quad (2)$$

Здесь  $\gamma_1, \gamma_2 \geq 0, \beta > 0, Q, Q_1, F, F_1$  – заданные постоянные.

**Задача.** Найти управление с обратной связью  $u^0(t, x(t)) \in U$  и решение  $x(t)$  уравнения (1), которые минимизируют критерий качества (2).

Будем использовать следующие обозначения для интегрального слагаемого в (1) и его производной Фреше [10]:

$$(G, x) = \int_0^t G(t, \tau)x(\tau)d\tau = y_1(x), \quad \frac{d}{dx} y_1(x) = \int_0^t G(t, \tau)d\tau = v(t). \quad (3)$$

Повторяя известную процедуру вывода уравнения Беллмана [8] и введенные обозначения (3), найдём следующее уравнение Беллмана для задачи (1), (2):

$$-\frac{\partial S}{\partial t} = \gamma_1 Qx^2(t) + \lambda \gamma_1 Q_1(G, x)^2 + Ax \frac{\partial S}{\partial x} + \lambda(G, x) \frac{\partial S}{\partial x} - \frac{B^2}{4\beta} \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)^2 \quad (4)$$

с дополнительным условием

$$S(T, x) = \gamma_2 Fx^2(T) + \lambda \gamma_2 F_1(G, x) \Big|_{t=T}. \quad (5)$$

Оптимальное управление находим по известной формуле [8, 9]

$$u^0(t, x(t)) = -\frac{B}{2\beta} \frac{\partial S(t, x(t))}{\partial x}. \quad (6)$$

В данной работе предложено развитие метода динамического программирования Р. Беллмана [8] для интегро-дифференциальной модели (1) и критерия (2).

Решение  $S(t, x)$  уравнения Беллмана (4) для модели (1) и критерия (2) ищем в виде формы второго порядка относительно  $x(t)$ :

$$S(t, x(t)) = K(t)x^2(t) + \lambda K_1(t)y_1^2(x) + \lambda K_2(t)x(t)y_1(x). \quad (7)$$

Из (7), используя обозначения (3), формулу вычисления производной Фреше [10] и формулу Ньютона-Лейбница дифференцирования по параметру, получаем

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} = & \frac{d}{dt} K(t) \cdot x^2(t) + \lambda \frac{d}{dt} K_1(t) (y_1(x))^2 + 2\lambda K_1(t) \left( \int_0^t \frac{\partial}{\partial t} G(t, \tau)x d\tau \right) y_1(x) + \\ & + 2\lambda K_1(t) G(t, t)x(t)y_1(x) + \lambda \frac{d}{dt} K_2(t)xy_1(x) + \lambda K_2(t) \left( \int_0^t \frac{\partial}{\partial t} xG(t, \tau)d\tau \right) x + \\ & + \lambda K_2(t)G(t, t)x^2(t), \quad (8) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial S}{\partial x} = 2K(t)x(t) + 2\lambda K_1(t) \int_0^t G(t, \tau)x(\tau)d\tau \int_0^t G(t, \tau)d\tau + \lambda K_2(t)y_1(x) + \lambda K_2(t)x(t) \int_0^t G(t, \tau)d\tau. \quad (9)$$

## 2. Вывод вспомогательных уравнений

Операторы  $x^2(t)$ ,  $(y_1(x))^2$ ,  $x(t)y_1(x)$  являются линейно независимыми. Определитель Вронского  $W(x)$ , выраженный через производную Фреше (3) [10], равен

$$W(x) = \begin{vmatrix} x^2(t) & \left( \int_0^t G(t, \tau)x(\tau)d\tau \right)^2 & x(t) \int_0^t G(t, \tau)x(\tau)d\tau \\ 2x(t) & 2 \int_0^t G(t, \tau)x(\tau)d\tau \int_0^t G(t, \tau)d\tau & \int_0^t G(t, \tau)x(\tau)d\tau + x(t) \int_0^t G(t, \tau)d\tau \\ 2 & 2 \left( \int_0^t G(t, \tau)d\tau \right)^2 & 2 \int_0^t G(t, \tau)d\tau \end{vmatrix}.$$

Выведем уравнения относительно вспомогательных функций  $K(t)$ ,  $K_1(t)$ ,  $K_2(t)$ .

Средствами пакета Maple из (4), учитывая (7–9), получим уравнение Беллмана, выраженное через вспомогательные функции.

Группируем в уравнении Беллмана коэффициенты при  $x^2(t)$ ,  $(y_1(x))^2$ ,  $x(t)y_1(x)$ . После преобразований получим вспомогательные уравнения Риккати относительно  $K(t)$ ,  $K_1(t)$ ,  $K_2(t)$ .

Вспомогательное уравнение относительно  $K(t)$  имеет вид

$$-\frac{dK(t)}{dt} = -\frac{B^2 K(t) \lambda K_2(t) v(t)}{\beta} - \frac{B^2 K^2(t)}{\beta} - \frac{1}{4} \frac{B^2 \lambda^2 K_2^2(t) v^2(t)}{\beta} + \gamma_1 Q + A \lambda K_2(t) v(t) + 2AK(t), \quad K(T) = \gamma_2 F. \quad (10)$$

Если  $\lambda = 0$ , из (10) получаем классическое уравнение относительно  $K(t)$  [8, 9].

Вспомогательные уравнения относительно  $K_1(t)$ ,  $K_2(t)$  имеют вид

$$-\frac{dK_1(t)}{dt} = -\frac{B^2}{4\beta} \lambda K_2^2(t) + \lambda K_2(t) - \frac{B^2}{\beta} \lambda K_1^2(t) v^2(t) + 2\lambda K_1(t) v(t) - \frac{B^2}{\beta} \lambda K_1(t) v(t) K_2(t) + \gamma_1 Q_1, \quad K_1(T) = \lambda \gamma_2 F_1; \quad (11)$$

$$-\frac{dK_2(t)}{dt} = 2K_1(t)G(t, t) - \frac{B^2}{2\beta} \lambda K_2^2(t) v(t) + AK_2(t) + 2K(t) - \frac{B^2}{\beta} K(t)K_2(t) + \lambda K(t)v(t) - \frac{B^2}{\beta} \lambda K_1(t)K_2(t)v^2(t) - \frac{2B^2}{\beta} K(t)K_1(t)v(t) + 2AK_1(t)v(t), \quad K_2(T) = 0. \quad (12)$$

Уравнения системы (10)–(12) являются взаимосвязанными.

Для функции  $G(t, \tau)$  введено ограничение

$$\frac{\partial}{\partial t} G(t, \tau) \equiv 0. \quad (13)$$

Учитывая (6), (7), (9), запишем формулу приближенного оптимального управления в виде

$$\tilde{u}^0(t, x(t)) = -\frac{B}{2\beta} \left( 2K(t)x(t) + 2\lambda K_1(t) \int_0^t G(t, \tau)x(\tau)d\tau \int_0^t G(t, \tau)d\tau + \lambda K_2(t) \int_0^t G(t, \tau)x(\tau)d\tau + \lambda K_2(t)x(t) \int_0^t G(t, \tau)d\tau \right). \quad (14)$$

Проверим применимость формулы (14) для управления процессом (1).

### 3. Пример моделирования

Составим модель некоторого процесса, описываемого уравнением вида (1). Для наглядности полагаем, что  $G$  – постоянная. Получаем уравнение

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + A\lambda G \int_0^t x(\tau)d\tau - AT_{00} - A\lambda T_{00} G \int_0^t d\tau + Bu(t), \quad x(0) = x_0. \quad (15)$$

Выполним моделирование поведения решения  $x(t)$  уравнения (15).

Пусть  $T_{00} = 0$ ,  $B = 0$ , тогда (15) приобретает вид

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + A\lambda G \int_0^t x(\tau)d\tau, \quad x(0) = x_0. \quad (16)$$

Строим графики (см. рис. 1, 2) решения задачи Коши (16) на интервале времени  $[0; t_k]$  по схеме Эйлера 1-го порядка при следующих значениях параметров:  $A = -1$ ,  $x_0 = -2$ ,  $T = 20$ ,  $G(t, \tau) \equiv G = 1$ ,  $\Delta t = T / 5000$ .

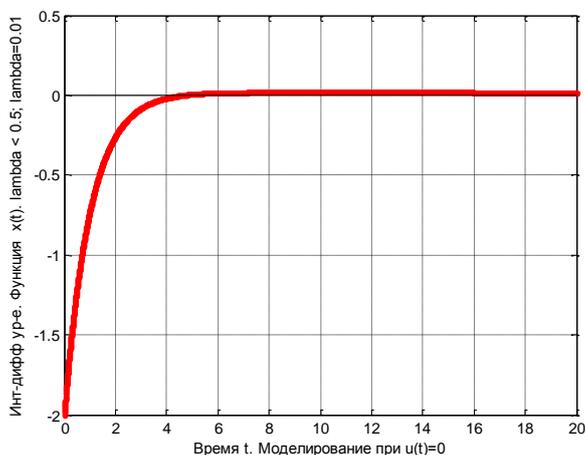


Рисунок 1 – Траектория  $x(t)$  при  $\lambda = 0.01$

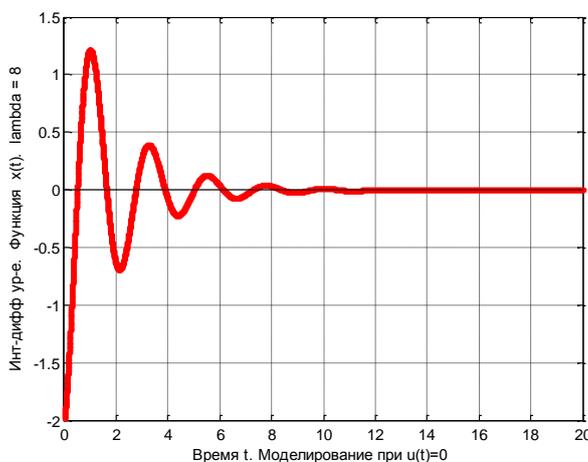


Рисунок 2 – Траектория  $x(t)$  при  $\lambda = 8$

Графики на рис. 1, 2 показывают, что при  $\lambda = 0.01$  процесс (16) ведет себя как монотонный, при  $\lambda = 8$  процесс (16) является колебательным.

#### 4. Задача оптимального управления

Решим численно задачу оптимального управления по расчетным формулам. Модель управляемого процесса – уравнение (16),  $T_{00} = 0$ :

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + A\lambda G \int_0^t x(\tau)d\tau + Bu(t), \quad x(0) = x_0. \quad (17)$$

При  $\lambda = 0.5$ ,  $B = 0$  получаем график функции  $x(t)$ , показанный на рис. 3.

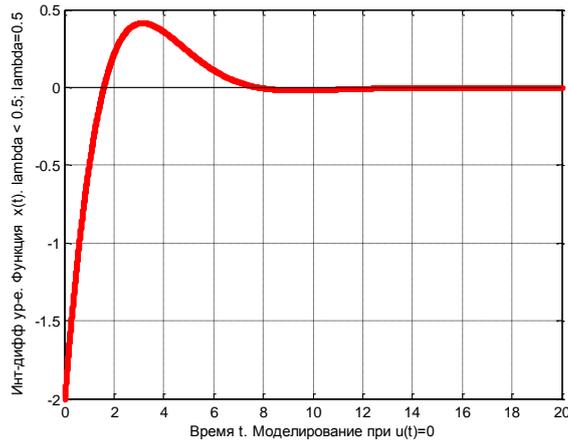


Рисунок 3 – Траектория  $x(t)$  при  $\lambda = 0.5$  и нулевом управлении  $u(t) \equiv 0$

Минимизируемый критерий качества имеет вид (2).

При решении уравнения Риккати (10)–(12) с заданными конечными условиями по схеме Эйлера первого порядка с параметрами  $\lambda = 0,5$ ;  $\beta = 0,5$  получены графики функций  $K(t)$ ,  $K_1(t)$ ,  $K_2(t)$ , приведены на рисунках 4–6.

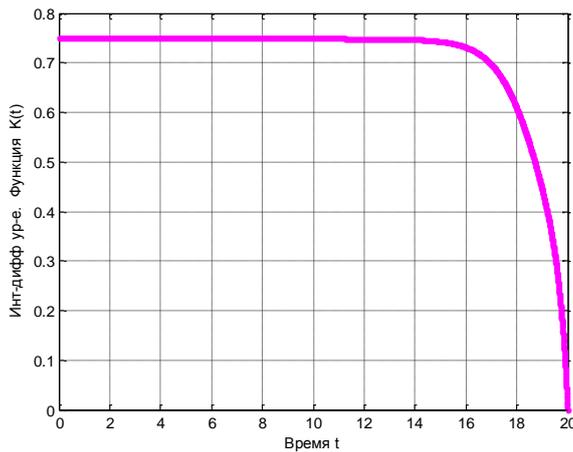


Рисунок 4 – Вспомогательная функция  $K(t)$

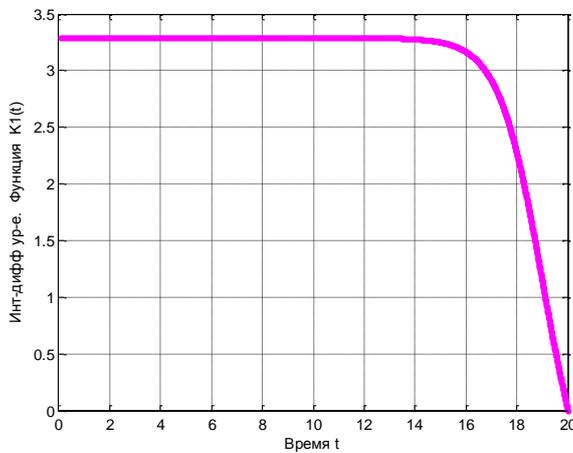


Рисунок 5 – Вспомогательная функция  $K_1(t)$

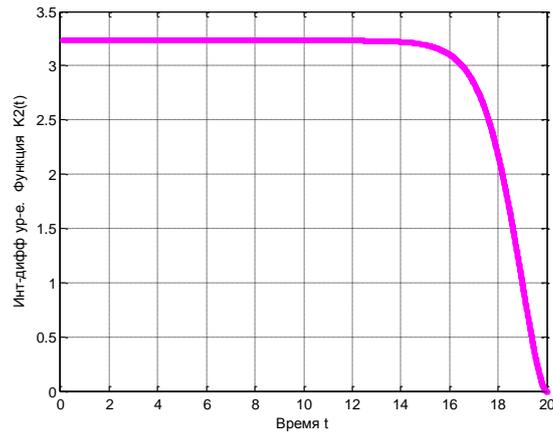


Рисунок 6 – Вспомогательная функция  $K_2(t)$

Вычисленные по (14), (17) функции  $\tilde{u}^0(t)$ ,  $x(t)$  приведены на рис. 7, 8.

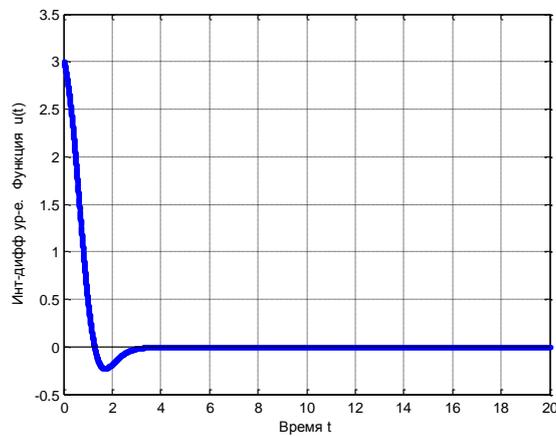


Рисунок 7 – Управление  $\tilde{u}^0(t)$ ,  $\gamma_2 = 0$ ;  $\beta = 0,5$ ;  $\lambda = 0,5$

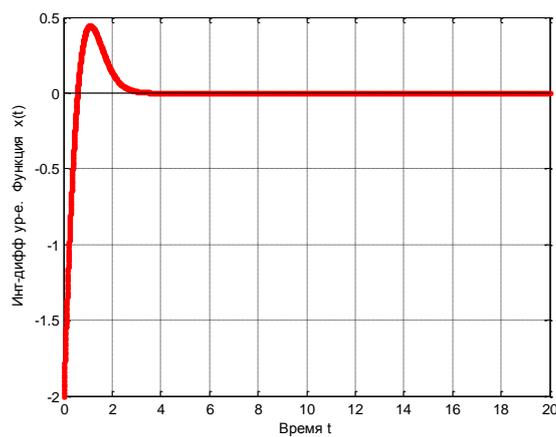


Рисунок 8 – Траектория  $x(t)$  при управлении  $\tilde{u}^0(t)$ ,  $\gamma_2 = 0$ ;  $\beta = 0,5$ ;  $\lambda = 0,5$

Сравнение графиков на рис. 3, 8 показывает, что управление  $\tilde{u}^0(t)$  значительно уменьшает время перехода траектории  $x(t)$  к нулю.

### **Заключение**

Построен алгоритм управления с обратной связью для процесса, описываемого одномерным линейным интегро-дифференциальным уравнением типа Вольтерра. Введены дополнительные вспомогательные функции Риккати. В рассмотренном примере свойства дополнительных функций совпадают со свойствами классических функций Риккати.

Выполненное компьютерное моделирование показало работоспособность предложенного алгоритма управления.

### **Литература**

1. Розовский М.И. Приложение интегро-дифференциальных уравнений к некоторым динамическим задачам теории упругости при наличии последствия // ПММ, XI, 1947.
2. Розовский М.И. Интегро-дифференциальные уравнения и проблема учета влияния фактора времени при расчетах механических, электромагнитных и тепловых процессов // Изв. Днепр. горн. ин-та, XXI, 1952.
3. Быков Я.В. О некоторых задачах теории интегро-дифференциальных уравнений. Фрунзе: Кирг. гос. ун-т, 1957. 327 с.
4. Быков Я.В. О некоторых методах построения решений интегральных и интегро-дифференциальных уравнений. Фрунзе: Изд-во АН Кирг. ССР, 1961. – 109 с.
5. Егоров А.И. Об асимптотическом поведении решений системы интегро-дифференциальных уравнений типа Вольтерра: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Фрунзе: Кирг. гос. ун-т, 1955.
6. Абдикеримов Т., Евсеенко Т.П. О методе сеток для задачи оптимального управления процессом, описываемым интегро-дифференциальным уравнением // Материалы 2-й юбилейной межвузовской научной конференции по математике и механике, посвященной 20-летию Киргизского гос. университета.– Фрунзе:– Кирг. гос. ун-т, 1971. – С. 16–18.
7. Юниси М.К. Математические модели управления агроценозами и охраняемыми биологическими популяциями: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: ВЦ АН СССР, 1990. – 313 с.
8. Беллман Р. Динамическое программирование: пер. с англ. С.П. Чеботарёва. Под ред. А.М. Летова. М.: Мир, 1974. 205 с.
9. Ройтенберг Я.Н. Автоматическое управление. М.: Наука, 1978. 552 с.
10. Люстерник Л.А., Соболев В.И. Элементы функционального анализа. М.: Наука, 1965. – 520 с.

*А. Д. Сатыбаев, Н. К. Кадыркулова [kadyrkulova74@mail.ru](mailto:kadyrkulova74@mail.ru)*

Ошский Технологический Университет им.М.М. Адышева, Кыргызстан

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ БАЙЕСОВСКОЙ СЕТИ**

В статье рассмотрены задачи, связанные с моделированием логической структуры образовательных объектов и динамики их взаимодействия.. Предложенные математические модели, которые применимы для широкого круга прикладных задач, возникающих при проектировании и разработке систем управления обучением. Актуальна проблема моделирования новой формы обучения на основе теории управления.

**Ключевые слова:** информационные технологии; математическая модель; дистанционное обучение; байесовская сеть; ориентированный граф; тестирование; семантическая модель; экспертная диагностика; линейное дифференциальное уравнение; коэффициент усвоения.

Дистанционное обучение приобретает все большее распространение в современных высших учебных заведениях. Глобализация в сфере высшего образования уменьшает препятствия на пути распространения технологий высшего образования и образовательных продуктов, при этом становится очевидной проблема конкурентоспособности отечественных вузов. Учитывая низкую платежеспособность большинства населения любой страны, а также высокую стоимость переезда в крупные города для получения образования, население будет отдавать предпочтение дистанционной форме обучения, которая характеризуется более низкими затратами по сравнению с традиционным очным и даже заочным обучением. Конкурентное преимущество и доход будут получать только те университеты, которые имеют современные системы дистанционного обучения, обеспечивающие студентам приобретение знаний за разумную плату [1].

### **Актуальность исследования**

Активное внедрение информационных технологий (ИТ) во все сферы человеческой деятельности предопределяет необходимость использования современных форм подготовки высококвалифицированных специалистов в области профессионального образования.

В практике лидирует новая образовательная тенденция, основанная на двух направлениях:

- 1) развитие открытого дистанционного образования на основе (информационных и телекоммуникационных технологий);
- 2) универсализация содержания и методов обучения с использованием электронных форм передачи материала.

### **Научная новизна**

1. Разработаны методы построения байесовской сети для моделирования знаний студентов, позволяющие сформировать иерархическую структуру знаний по учебным дисциплинам и описывать владение темами, знание необходимых компетенций, спо-

способность выполнять задачи и оценивать правильность задач и их элементы для конкретного студента.

2. Предложена модель дистанционного обучения студентов, основанная на байесовской сети, которая позволяет студентами получать знания на различных уровнях детализации, включая разделы, темы учебного курса, требуемые компетенции, тестовые задания и их семантические элементы.

**Практическая значимость и внедрение результатов:** разработан программный комплекс «Distant learning», предназначенный для автоматизации дистанционного тестирования с отправкой результатов на электронную почту.

**Цель исследования:** моделирование дистанционного обучения на основе байесовской сети с использованием семантической модели для экспертной диагностики знаний студентов.

**Методы исследования:** исследование байесовской сети для анализа и диагностики знаний студентов проводится с помощью дистанционного тестирования.

Байесовские сети являются одним из видов вероятностных графических моделей. Строгое формальное описание и теория байесовских сетей доверия построены и разработаны Тулупьевым А.Л. и др.[2].

Процесс дистанционного обучения можно описать линейным дифференциальным уравнением

$$\frac{dZ}{dt} = kZ(t) + \sum_{i=0}^5 k_i u_i(t), \quad (1)$$

где,  $Z(t)$  – объем академических часов в момент времени  $t$ ;  $k$  – коэффициент изучения;  $u_0$  – управление программой, запланированная рабочая нагрузка, выполняемая преподавателем в режиме онлайн (в академических часах);  $u_2$  – управление программным обеспечением в качестве нагрузки для самообучения;  $u_4$  – управление программой в виде просмотра видео-лекций, утвержденная в процессе традиционного обучения;  $k_0$  – коэффициент изучения новых знаний при обучении с помощью онлайн-преподавателя;  $k_2$  – коэффициент изучения для управления и  $k_4$  – коэффициент изучения для управления  $u_4$ ;  $u_1$  – управление процессом повторения посредством контрольных и самостоятельных работ после онлайн-обучения преподавателя ( $u_1$  – управление с обратной связью);  $k_1$  – коэффициент изучения для управления  $u_1$ ;  $u_3$  – управление с обратной связью при повторении материала, изученного самостоятельно;  $k_3$  – коэффициент изучения для управления  $u_3$ ;  $u_5$  – управление с обратной связью при повторении материала, изученного в виде видео-лекций;  $k_5$  – коэффициент изучения для управления  $u_5$  [2].

Все указанные коэффициенты безразмерны и изменяются в пределах от нуля до пяти ( $0 \leq k, k_i \leq 5, i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ ).

### Построение байесовской сети для моделирования знаний студентов

Построенные семантические модели представляют собой формальное описание структуры знания и компетенции студентов, применимое для машиночитаемого представления и компьютерной обработки. При этом для каждого преподавателя предлагается опираться на свои базовые модели знания студентов в виде байесовских сетей.

Модели, основанные на байесовских сетях, активно используются в последние годы для разработки инструментов компьютерного обучения и тестирования [2].

Рассмотрим в качестве примера адаптивное тестирование студентов по дисциплине А в задаче моделирования дистанционного обучения.

Структура учебного курса включает разбиение дисциплины на главы  $T_1, \dots, T_s$ , а каждая из глав  $T_i$ , в свою очередь, соответствует совокупности понятий  $C_{i1}, \dots, C_{in_i}$  [3].

Тестирование включает в себя набор тестовых элементов  $P_1, \dots, P_r$ , каждый из которых может потребовать владения одним или несколькими понятиями. В свою очередь, владение каждым из понятий может быть необходимо для выполнения одного или нескольких тестовых заданий.

Для моделирования знания в данной статье, байесовская сеть использована с двоичными переменными, связанными с главами, понятиями и заданиями. Условные значения для переменных  $C_{i1}, \dots, C_{in_i}$  задаются преподавателем, для переменных  $T_1, \dots, T_s$  и А – основаны на взвешенных суммах вкладов основных узлов, а для переменных  $P_1, \dots, P_r$  – с помощью дискретизации модифицированной трёхпараметрической логистической функции [2, 4].

В работе [3] структура байесовской сети для моделирования знаний основана на наборе единиц знаний  $S$  и двух заданных на нем бинарных отношений: отношения включения  $U$  и отношения предшествования  $W$ , и предполагается, что пара  $(S, U)$  образует лес, а  $(S, W)$  – ациклический орграф. Эта модель не описывает само тестовое задание и соответствующие компетенции, а оценка знаний осуществляется только на основе косвенных доказательств, полученных в процессе тестирования.

Формирование байесовской сетевой структуры предполагается осуществлять на основе предложенной нами семантической модели предикатной части учебной дисциплины.

Фрагмент этой модели представлен в виде графа рис. 1, где  $T_1, \dots, T_N$  – темы;  $C_1, \dots, C_M$  – элементарные компетенции;  $Q_1, \dots, Q_K$  – задания;  $E_1, \dots, E_P$  – структурные элементы заданий;  $S_1, \dots, S_L$  – семантические элементы заданий.

Подграф, содержащий задания и их структурные элементы, описывает семантику взаимодействия студента с компьютером во время тестирования, а подграф, содержащий темы, описывает элементарные компетенции, задания и их семантические элементы, отображает семантическую структуру, используемую для анализа и оценки результатов теста. Второй из этих подграфов может быть использован в качестве основы для построения структуры байесовской сети.

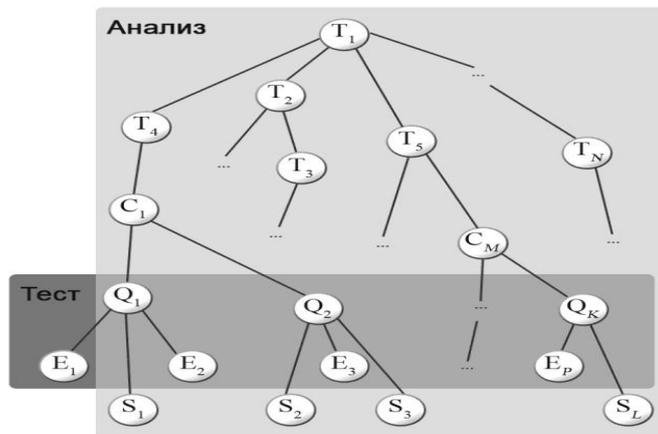


Рисунок 1 – Представление структуры семантической модели знаний студента в виде графа.

Рассмотрим тестирование, при котором студент, выбранный случайным образом из числа обучающихся у одного и того же преподавателя, выполняет все задания  $Q_1, \dots, Q_K$ . В результате тестирования каждый из семантических элементов заданий  $S_1, \dots, S_L$  принимает правильное или неправильное значение.

По результатам теста преподаватель проводит *экспертную диагностику знаний студента*, то есть выступает в качестве эксперта и некоторым способом оценивает, выполнил ли студент каждое из заданий  $Q_1, \dots, Q_K$ , так как каждая из элементарных компетенций  $C_1, \dots, C_M$  проверяется этими заданиями; обладает ли студент каждой из тем учебной дисциплины  $T_1, \dots, T_N$ . Проанализируем только двухзначные оценки, а именно:  $t_i \in \{<владеет>, <не владеет>\}$  для каждой из тем  $T_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ ;  $c_j \in \{<обладает>, <не обладает>\}$  для каждой из компетенций  $C_j$ ,  $j = 1, \dots, M$ ;  $q_k \in \{<умеет>, <не умеет>\}$  для каждого из заданий  $Q_1, \dots, Q_K$ ,  $k = 1, \dots, K$ ;  $s_l \in \{<верно>, <не верно>\}$  для каждого из семантических элементов  $S_1, \dots, S_L$ ,  $l = 1, \dots, L$ .

Введем конечное пространство элементарных событий  $\Omega = \omega \{(t_1, \dots, t_N, c_1, \dots, c_M, q_1, \dots, q_K, s_1, \dots, s_L)\}$ , состоящее из всех возможных векторов полученных оценок, и алгебру событий  $A = \{A: A \subseteq \Omega\}$ .

Рассмотрим следующие пары противоположных событий, которые являются объединением элементарных событий  $\omega \in \Omega$ : и  $T_i = U_{t_i = <владеет>} \omega$ ,  $\bar{T}_i = U_{t_i = <не владеет>} \omega$ ,  $i = 1, \dots, N$ ;  $C_j = U_{c_j = <обладает>} \omega$ , и  $\bar{C}_j = U_{c_j = <не обладает>} \omega$ ,  $j = 1, \dots, M$ ;  $Q_k = U_{q_k = <умеет>} \omega$ , и  $\bar{Q}_k = U_{q_k = <не умеет>} \omega$ ,  $q = 1, \dots, K$ ;  $S_l = U_{s_l = <верно>} \omega$ , и  $\bar{S}_l = U_{s_l = <не верно>} \omega$ ,  $l = 1, \dots, L$ . Любое событие из  $A$  можно представить в виде объединения пересечений некоторых из перечисленных событий  $T_i, \bar{T}_i, C_j, \bar{C}_j, Q_k, \bar{Q}_k, S_l, \bar{S}_l$ .

Введем двухзначные переменные  $T_1, \dots, T_N, C_1, \dots, C_M, Q_1, \dots, Q_K$  и  $S_1, \dots, S_L$  сформированной байесовской сети как функции, определенные на рассматриваемых парах противоположных событий:

$$\begin{cases} T_i(T_i) = 1 \\ T_i(\bar{T}_i) = 0 \end{cases}, i = 1, \dots, N; & \begin{cases} C_j(C_j) = 0 \\ C_j(\bar{C}_j) = 1 \end{cases}, j = 1, \dots, M; \\ \begin{cases} Q_k(Q_k) = 1 \\ Q_k(\bar{Q}_k) = 0 \end{cases}, k = 1, \dots, K; & \begin{cases} S_l(S_l) = 1 \\ S_l(\bar{S}_l) = 0 \end{cases}, l = 1, \dots, L. \end{cases}$$

Каждую из представленных переменных поместим во взаимно-однозначном соответствии в узел сформированной байесовской сети.

Предположим, что владение основной темой напрямую влияет на владение тематикой и компетенцию, которую она включает. Владение компетенцией напрямую влияет на способность выполнять проверочные задания, а возможность выполнения заданий напрямую влияет на правильность заполнения семантических элементов.

Расставим соответствующие дуги между узлами байесовской сети. Узел, от которого дуга идет к этому узлу, будем называть *родительским узлом* или *родителем* этого узла. Переменная  $T_1$ , у которой нет родительского узла, будем называть *корневым узлом*.

Сформированная структура байесовской сети называется ориентированным деревом (*ордеревом*) и показана на рис. 2.

По результатам тестов преподаватель дает экспертные оценки владения темами, владения компетенциями, умения выполнять поставленную задачу. Поэтому переменные  $S_1, \dots, S_L$  называются *наблюдаемыми*, а  $T_1, \dots, T_N$ ,  $C_1, \dots, C_M$  и  $Q_1, \dots, Q_K$  – *скрытыми*. Все наблюдаемые переменные этой байесовской сети являются листьями построенного ордерера.

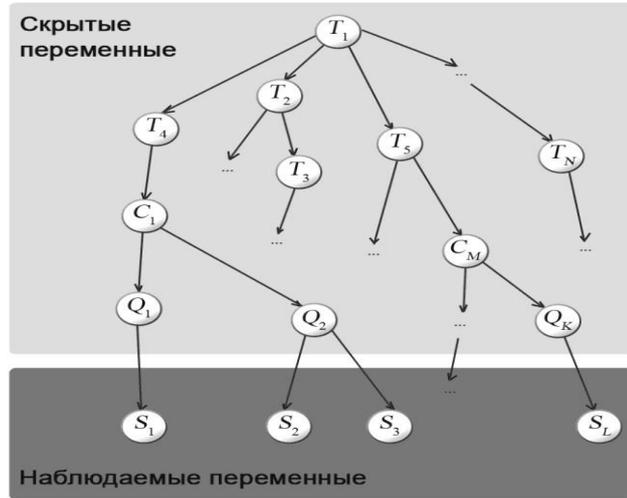


Рисунок 2– Структура байесовской сети для моделирования знаний студентов.

Этот вариант сети представляется более подходящим для рассматриваемой задачи, поскольку преподавателю не требуется устанавливать ни условные вероятности для переменных байесовской сети, ни какие-либо другие косвенные параметры модели. Его задача сводится к стандартной оценке результатов учащегося: владеет/не владеет, обладает/не обладает, умеет/не умеет.

**Использование байесовской сети для анализа и диагностики при проверке знаний**

Целью тестирования знаний является создание оценки владения темами, компетенциями и умения выполнять тестовые задания. В представленной модели, основанной на байесовской сети, определим условные вероятности для каждой из переменных  $T_1, \dots, T_N$ ,  $C_1, \dots, C_M$ ,  $Q_1, \dots, Q_K$  и для полученных значений переменных  $S_1, \dots, S_L$ .

Пусть задана байесовская сеть с булевыми случайными элементами  $\mathbf{X} = \{X_1, \dots, X_n\}$ . Совместное распределение определяется по формуле [2, 3].

$$P(\bar{X}_1, \dots, \bar{X}_n) = \prod_{i=1}^n P(\bar{X}_i | (\overline{pa(\bar{X}_i)})), \tag{2}$$

где  $pa(X_i)$  – множество родителей  $X_i$ , а в случае, если у узла  $X_i$  нет родителей,  $P(\bar{X}_i | (\overline{pa(\bar{X}_i)})) = P(\bar{X}_i)$ . Формула (2) позволяет рассчитать предельную вероятность любой комбинации значений переменных из множества  $\mathbf{X}$ .

В результате исследований предложенной модели построена структурная схема алгоритма проверки знаний студентов показанная на рис. 3.

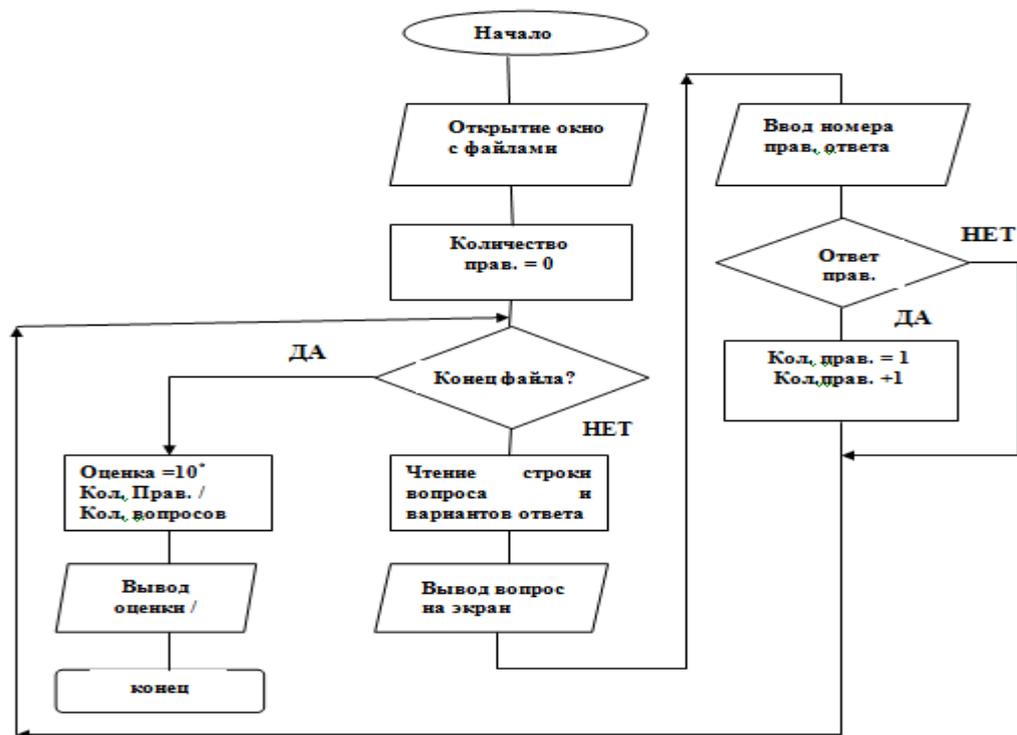


Рисунок.3 – Структурная схема алгоритма проверки знаний студентов

### Заключение

Использование интернет-технологий и дистанционного обучения открывает новые возможности для непрерывной подготовки и переподготовки специалистов, делает обучение более доступным.

Семантическая модель, в виде байесовской сети, применяется для автоматизации экспертной диагностики знаний студентов, разработки эффективных вычислительных алгоритмов для оценки параметров и оценивания вероятностей скрытых сетевых переменных. Таким образом, предложенная модель учебного процесса может быть применена для решения проблемы поддержания высокого качества знаний при переходе на новую форму обучения.

### Литература

1. Касьянова, Е. В. Адаптивные методы и средства поддержки дистанционного обучения программированию: дис. канд. физ.-мат. наук: 05.13.11 / Е. В. Касьянова. – Новосибирск, 2006. – 181 с.
2. Тулупьев, А. Л. Байесовские сети: логико-вероятностный подход / Тулупьев, А. Л. Байесовские сети доверия: логико-вероятностный вывод в ациклических направленных графах / А. Л. Тулупьев, А. В. Сироткин, С. И. Николенко. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2009. – 400 с.
3. Сологуб, Г. Б. Построение и использование байесовской сети для моделирования знаний студента в интеллектуальной системе тестирования / Г. Б. Сологуб // Компьютерные инструменты в образовании. – 2012. – № 2. – С. 40–48.
4. Майер, Р. В. Кибернетическая педагогика: имитационное моделирование процесса обучения / Р. В. Майер. – Глазов: ГГПИ, 2013. – 138 с.

*В.В. Гайдамако, dolpha@gmail.com*

*Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР, Бишкек*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЛАЧНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ БИБЛИОТЕКИ SIMGRID

Рассмотрен прототип модели облачной информационно-измерительной системы (ОИИС), созданный с помощью библиотеки моделирования облачных и распределенных систем Simgrid. Модель включает физические и виртуальные датчики, координаторы, облачные станции и сервера хранения, позволяет менять состав и топологию сети через файл описания платформы. Файл трассировки, доступный после завершения работы модели, позволяет анализировать состояние элементов в любой момент времени с визуализацией результатов.

**Ключевые слова:** облачные информационно-измерительные системы, моделирование облачных систем, библиотека Simgrid, виртуальные датчики, сенсорные сети.

**Введение.** В процессе разработки, эксплуатации и исследования облачных систем возникает потребность в тестировании и определении влияния изменений, вносимых в оборудование и программное обеспечение, системы – на производительность, отказоустойчивость, безопасность, масштабируемость, однако не всегда есть возможность провести тестирование или эксперимент на реальных облачных системах (натурное моделирование) – стоимость слишком высока, невозможно получить полный контроль, условия эксперимента невоспроизводимы. В связи с этим очень высока потребность в моделировании таких систем. Моделирование позволяет полностью контролировать переменные и воспроизводить эксперимент. Одним из способов моделирования является имитационное моделирование. К настоящему времени разработан ряд программных продуктов, предназначенных для имитационного моделирования распределенных и облачных систем – GridSim[1], CloudSim и ее расширения [2], GreenCloud [3], ICanCloud [4], Simic [5], SimGrid [6] и множество других. Доступно множество обзоров средств моделирования [7, 8]. В настоящей работе рассматривается пример моделирования простой облачной информационно-измерительной системы с помощью библиотеки SimGrid, позволяющей использовать для создания модели как Java, так и C++. Нами моделирование производилось на языке C++. Эта библиотека была выбрана, поскольку предоставляет возможность моделирования виртуальных машин, перемещаемых между серверами. Для облачных систем вообще важна возможность моделирования виртуальных ресурсов, а для облачных информационно-измерительных систем (ОИИС) важным компонентом системы являются виртуальные датчики, представляемые виртуальными машинами или контейнерами.

### **Библиотека SimGrid – основные компоненты модели**

Модель SimGrid состоит из следующих сущностей:

- движок модели (Engine) – синглтон, выполняется в единственном экземпляре на машине;
- акторы (Actor) – активные сущности, исполняющие активности;
- активности – приложения, исполняемые акторами;
- почтовые ящики (MailBox) – используются для осуществления взаимодействия между акторами, точки коммуникации;
- платформа – описание доступных ресурсов.

Элементы вычислительной платформы описывают доступные ресурсы: хосты, или узлы (Host), обеспечивающие вычислительные мощности, на которых размещаются Акторы. Связи между хостами описываются с помощью линий связи (Links). Хосты с линиями связи объединяются в сетевые зоны (NetZone). Ресурсы для записи и чтения данных – хранилища (Storage). Виртуальные машины (VirtualMachine) – контейнеры исполнения, которые могут перемещаться между хостами.

Те действия, которые акторы выполняют на ресурсах – активности (Activities). Активность коммуникации (Comm) использует линии связи и запускается на почтовом ящике. Вычислительная активность (Exec) выполняется на хосте и потребляет ресурсы процессора, при этом можно задать длительность активности во флопсах – операциях с плавающей точкой в секунду.

Для синхронизации используются классические механизмы взаимодействия между процессами – барьеры (Barrier), условные переменные (ConditionVariable), мьютексы (Mutex) и семафоры (Semaphore).

Платформа – ресурсы, имеющиеся в наличии, и акторы, описывается с помощью файлов XML, эксперимент описывается в файле развертывания (deployment file). При запуске модели можно собрать статистику и после завершения работы детально проанализировать работу модели, в том числе с использованием средств визуализации. Топологию платформы можно визуализировать. [9]

### **Описание платформы**

Описание Моделируемой платформы содержит базовые элементы: хосты, линии связи, сетевые зоны, маршрутизаторы и их характеристики: задержку и пропускную способность линий связи, скорость вычислений на хостах (в флопсах), используемую маршрутизацию. В описание платформы можно поместить сценарий эксперимента с количественными (изменение пропускающей способности линии связи под влиянием внешних воздействий) и качественными (отказ и восстановление элементов платформы) изменяемыми характеристиками. Все элементы размещаются в сетевых зонах.

Для каждого хоста указывается вычислительная мощность (скорость вычислений) во флопсах для каждого ядра, количество ядер, координаты и другие характеристики [10].

Файл развертывания модели задает последовательность запуска активностей на хостах и параметры функций для активностей. Такое разделение описания платформы и параметров запуска от кода очень удобно, поскольку можно, не меняя кода изменять состав и топологию платформы, параметры аппаратуры и линий связи.

### **Моделируемая система**

В настоящей работе рассматривается модель облачной информационно-измерительной системы, (рис. 1). Эта модель является упрощением модели, предложенной в [11] для реализации инфраструктуры Sensor-Cloud. Компонентами инфраструктуры являются:

- беспроводные сенсорные сети (БСС) - включают физические датчики (моты) координаторов, сенсорных шлюзов;
- физические датчики, (моты), то есть микроконтроллерные платы, на которых размещаются процессор, память – флэш и оперативная, цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи, радиочастотный приемопередатчик, источник питания и интерфейсы для подключения разнообразных датчиков. Моты используются только для сбора, первичной обработки и передачи сенсорных данных [12, 13];
- координатор БСС: работает с одним или несколькими датчиками (мотами), снабжает их питанием и предоставляет возможности передачи данных, упаков-

- выводит и передает данные, собранные со всех подключенных датчиков. Координатор и некоторые датчики имеют возможность передачи данных на шлюз облака (подключены к Интернет), если же возможна только кратковременная передача (например, по радиоканалу), координатор передает данные на сенсорный шлюз;
- сенсорный шлюз (Sensor Gateway) – перенаправляет данные, полученные от координаторов или датчиков, на шлюз облака. В данной модели функции сенсорного шлюза выполняет координатор;
  - шлюз облака, или облачная станция (Cloud Gateway, Cloud Station), – принимает данные от сенсорных шлюзов, распаковывает и перенаправляет их на один из серверов облака для дальнейшего их использования, хранения, обработки и предоставления информации пользователям [14]. В рассматриваемой модели облачная станция выполняет также функции предоставления сервиса – на нем создаются виртуальные датчики.

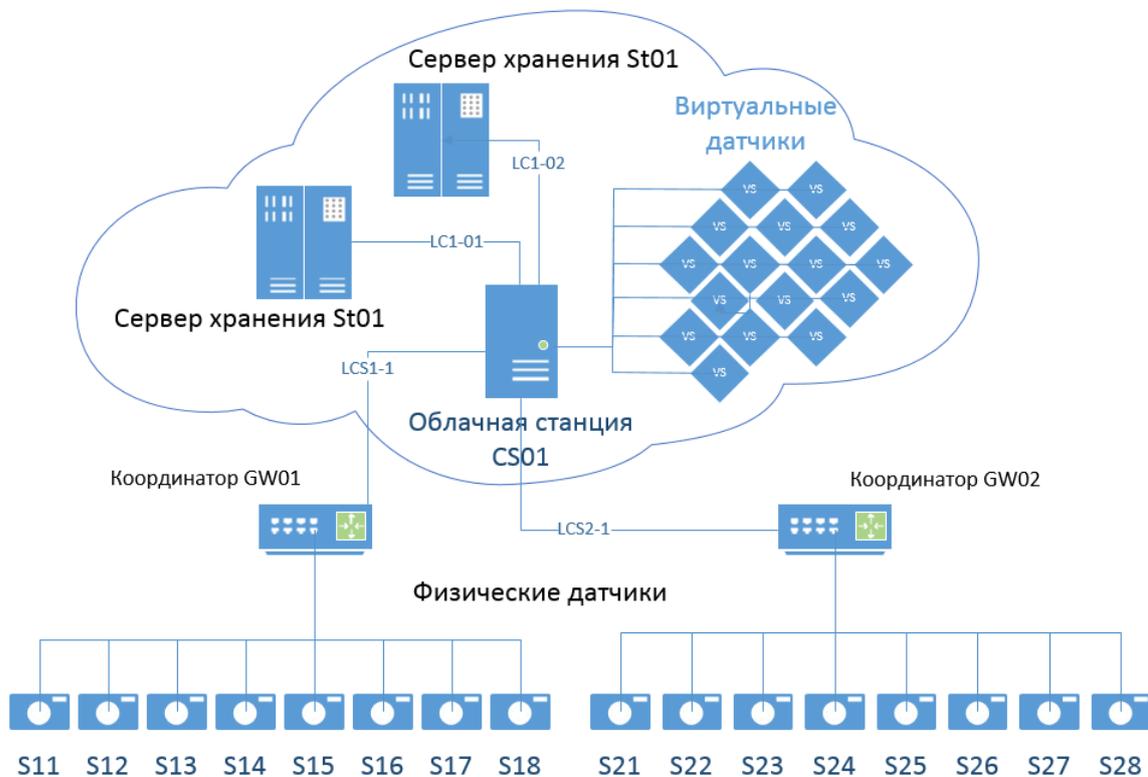


Рисунок 1– Моделируемая облачная информационно-измерительная система

Акторами в данной системе являются:

- физические датчики (Sensor);
- координатор (Coordinator) – собирает измерения от всех подсоединенных датчиков и передает их облачной станции. Координатор вместе с подсоединенными датчиками образует БСС;
- облачная станция, или шлюз облака (Cloud Station, CS) – принимает потоки данных от координаторов и передает их на сервера хранения и на виртуальные датчики;
- виртуальные датчики – (Virtual Sensors, VS) – виртуальные машины (контейнеры), в модели однозначно соответствующие физическим датчикам и со-

здаваемые для каждого пользователя или приложения, воспроизводящие поток данных от физических датчиков.

Таким образом, платформа содержит следующие типы хостов, которые должны быть описаны в файле платформы:

- хост Sensor – не все процессоры, использующиеся в микроконтроллерах, поддерживают операции с плавающей точкой. Предположим, что в микроконтроллерах используется процессор MSP430F47186 (Texas Instruments). Верхний предел операций с плавающей точкой может быть оценен в 0.66 Мфлопс, поэтому для датчиков указана скорость вычислений в 500Кфлопс [15];
- хост Координатор (Gateway). Управляет подсоединенными датчиками (модулями), собирает сенсорную информацию, частично обрабатывает ее и передает в облако, на облачную станцию. Роутер ASRock X10 [16], предназначенный для использования в ZigBee и других беспроводных сетях, оснащен процессором Qualcomm с архитектурой ARM Cortex-A7, скорость для операций с плавающей точкой двойной точности менее 0.8 Гфлопс [17];
- хост Облачная Станция (Cloud Station) – собирает сенсорную информацию, а также информацию о состоянии датчиков с подсоединенных координаторов и перенаправляет по назначению – на виртуальные датчики или серверы хранения. Предположим, что это не самый производительный Intel(R) Core(TM) i5 с 4 ядрами, скорость около 20 Гфлопс для каждого ядра [18, 19].
- хост Сервер Хранения также 20 Гфлопс на каждое из 4 ядер.

Также необходимо описать линии связи с указанием пропускной способности (bandwidth) – максимального количества единиц информации в секунду [19] и задержка (latency), которая может возникать из-за необходимости кодирования или упаковки данных. Датчики подключены к координатору по беспроводной сети. (На данном этапе эксперимента не рассматривалась возможность связи между датчиками и организации mesh-сети). Предположим, что используется протокол ZigBee, и, следовательно, стандарт IEEE 802.15.4, скорость передачи может быть от 20 до 250 КБ/с, примем максимальную скорость передачи (пропускная способность) 250 кБ/с.

Линия связи между координатором и облачной станцией – Интернет соединение, возможно, не самое быстрое – 10Мб/с. Линия связи между облачной станцией и сервером хранения более скоростная – 30Мб/с при моделировании. Возможно даже имитировать сбои и колебания пропускной способности на линии. Для линий связи необходимо указать политику совместного использования – SHARED – если по линии может одновременно передаваться несколько потоков данных. В этом случае пропускная способность будет поровну поделена между которыми, и FATPIPE – когда каждый поток полностью использует всю пропускную способность линии. Значение по умолчанию = SHARED [9].

Для краткости описание платформы приведено для системы, состоящей из одной облачной станции, одного сервера хранения, одного координатора с двумя подсоединенными датчиками:

```
<?xml version='1.0'?>
<!DOCTYPE platform SYSTEM "http://simgrid.gforge.inria.fr/simgrid/simgrid.dtd">
<platform version="4.1">
<zone id="Z0" routing="Full">
  <host id="St01" speed="20Gf" core="4"/>
  <host id="CS01" speed="20Gf" core="4"/>
  <host id="GW01" speed="800Mf"/>
  <host id="S11" speed="10000f"/>
  <host id="S12" speed="10000f"/>
  <link id="LC1-01" bandwidth="30MBps" latency="100us"/>
</zone>
</platform>
</?xml>
```

```

<link id="LCS1-1" bandwidth="10MBps" latency="100us"/>
<link id="LS1-1" bandwidth="0.250MBps" latency="150us"/>
<link id="LS1-2" bandwidth="0.250MBps" latency="150us"/>
<route src="CS01" dst="St01"><link_ctn id="LC1-01"/><link_ctn id="LC1-
01"/></route>
<route src="CS01" dst="GW01"><link_ctn id="LCS1-1"/><link_ctn id="LCS1-
1"/></route>
<route src="GW01" dst="S01"><link_ctn id="LS1-1"/><link_ctn id="LS1-
1"/></route>
<route src="GW01" dst="S02"><link_ctn id="LS1-2"/><link_ctn id="LS1-
2"/></route>
</zone>
</platform>

```

В определении платформы описывается **маршрутизация**, используемая как внутри сети или подсети (в сетевой зоне), так и между зонами. Это необходимо для вычисления на модели времени передачи данных по линиям связи с учетом задержки и пропускной способности линии для модели:  $T_{ij}(S) = L_{ij} + S/B_{ij}$ , где  $S$  – размер сообщения,  $L_{ij}$  – задержка между  $i$  и  $j$ ,  $B_{ij}$  – пропускная способность между  $i$  и  $j$ .

Возможны различные классы зон – FullZone, ClusterZone, FloydZone, DragonflyZone, DijkstraZone, TorusZone, VivaldiZone, представляющие соответствующий алгоритм маршрутизации или топологию сети. VivaldiZone используется для Peer-to-Peer и облачных платформ, при этом маршрутизация основывается на вычислении кратчайшего маршрута исходя из координат каждого пира. В данной модели использована FullZone – описываются все существующие маршруты между хостами, хотя обычно этот тип маршрутизации используется для описания топологии сети внутри ЦОД (центра обработки данных) при относительно небольшом количестве компонент сети [9].

#### **Активности (действия, осуществляемые акторами):**

Физические датчики:

- измерение – генерация данных, в модели – генерация случайного числа из диапазона;
- передача данных координатору – осуществляется по запросу от координатора.

Координаторы:

- по запросу от облачной станции: прием данных от физических датчиков, данные принимаются последовательно от каждого датчика;
- передача данных облачной станции.

Облачная станция (шлюз облака):

- инициация цикла сбора данных от датчиков-передачи на хранение путем передачи запросов координаторам;
- прием данных от координаторов, причем данные от каждого координатора в одном цикле опроса накапливаются и все вместе передаются серверу хранения;
- передача пакета данных, полученных от координатора для хранения на сервера хранения;
- передача данных на виртуальные датчики.

Сервер хранения:

- Прием данных от облачных станций.

Виртуальные датчики

- прием данных от облачных станций.

Для каждой активности создается соответствующая функция. Код функции может включать функцию `simgrid::s4u::this_actor::execute(<flops>)`, в этом случае актор будет имитировать исполнение <flops> операций с плавающей точкой.

Кроме кодирования функций для каждой активности необходимо создать функцию `main()`, в которой регистрируются функции активностей, считываются из файлов конфигурация платформы и порядок запуска активностей на хостах [9]:

```
int main(int argc, char* argv[])
{
    simgrid::s4u::Engine e(&argc, argv);
    xbt_assert(argc > 2, "Usage: %s platform_file deployment_file\n", argv[0]);

    /* Register the functions representing the actors */
    e.register_function("cloudstation", &cloudstation);
    e.register_function("storage", &storage);
    e.register_function("coordinator", &coordinator);
    e.register_function("sensor", &sensor);
    /* Load the platform description and then deploy the application */
    e.load_platform(argv[1]);
    e.load_deployment(argv[2]);
    e.run();
    XBT_INFO("MAIN Simulation is over");
    return 0;
}
```

#### Файл развертывания:

Для краткости описание платформы приведено для системы из одной облачной станции, двух серверов хранения, двух координаторов, к каждому из которых подсоединены по два датчика:

```
<?xml version='1.0'?>
<!DOCTYPE platform SYSTEM
"http://simgrid.gforge.inria.fr/simgrid/simgrid.dtd"
<platform version="4.1">
  <!-- The master actor is cloud station -->
  <actor host="CS01" function="cloudstation">
    <argument value="20"/> <!-- Number of cycles -->
    <argument value="50000000"/> <!-- Computation size of tasks -->
    <argument value="1000000"/> <!-- Communication size of tasks -->
    <argument value="GW01"/> <!-- Coordinators connected -->
    <argument value="GW02"/> <!-- Coordinators connected -->
  </actor>
  <!-- Storage processes (with no argument) -->
  <actor host="St01" function="storage" />
  <actor host="St02" function="storage" />
  <actor host="GW01" function="coordinator">
    <argument value="S11"/>
    <argument value="S12"/>
  </actor>
  <actor host="GW02" function="coordinator">
    <argument value="S21"/>
```

```
<argument value="S22"/>
</actor>
<actor host="S11" function="sensor" />
<actor host="S12" function="sensor" />
<actor host="S21" function="sensor" />
<actor host="S22" function="sensor" />
</platform>
```

В модели к каждому координатору подключены по 8 датчиков. Виртуальные датчики не описаны в файле платформы, они будут созданы программно на том же хосте, что и облачная станция.

### Результаты моделирования

После компиляции и сборки модели можно ее запустить, передавая имена файлов платформы и развертывания в качестве параметров:

```
<model_file> <platform_file> <deployment_file>
```

Поведение модели можно анализировать по выводу на экран (приведен фрагмент):

```
[CS01:cloudstation:(3) 124.479774] [s4u_app_masterworker/INFO] CS i=19 Received data: 'S13 S13 37' from coordinator 'GW01' from mailbox 'crd-GW01-gc'
[GW01:coordinator:(6) 124.574178] [s4u_app_masterworker/INFO] GW i=3 Received from sensor 'S14' from mailbox 'sns-S14-sg': 'S14 S14 41'
[GW01:coordinator:(6) 124.574178] [s4u_app_masterworker/INFO] GW j=0 Sending
[GW01:coordinator:(6) 124.887679] [s4u_app_masterworker/INFO] GW j=0 Sending
[CS01:cloudstation:(3) 126.266375] [s4u_app_masterworker/INFO] CS j=0 Sending data to storage 'St01' from mailbox 'st-St01'
```

В выводе указывается хост, на котором выполняется активность, выполняемая функция, номер процесса, время модели в секундах с начала симуляции, уровень сообщения (INFO, DEBUG) и само сообщение. Анализировать такой вывод достаточно трудно, он важен скорее для отладки модели, контроля правильности передачи информации. Для анализа использованы средства визуализации и статистического анализа результатов моделирования. При запуске модели для получения файла отслеживания состояния компонент системы (трейсинга), в котором отражаются использование вычислительной мощности хостов и пропускной способности линий связи во время симуляции, указываем

```
<model_file> <platform_file> <deployment_file> --cfg=tracing:yes
--cfg=tracing/msg/process:yes
```

После завершения работы модели создается файл `simgrid.trace`, который можно визуализировать с помощью пакета `vite`. Результат визуализации для модели, не содержащей виртуальных датчиков, показан на рис.2. Облачная станция инициирует обмен с координатором, который, в свою очередь, опрашивает подсоединенные физические датчики и немедленно передает полученные данные облачной станции. Облачная станция в цикле опроса накапливает данные с координатора и отправляет их одним пакетом серверу хранения.

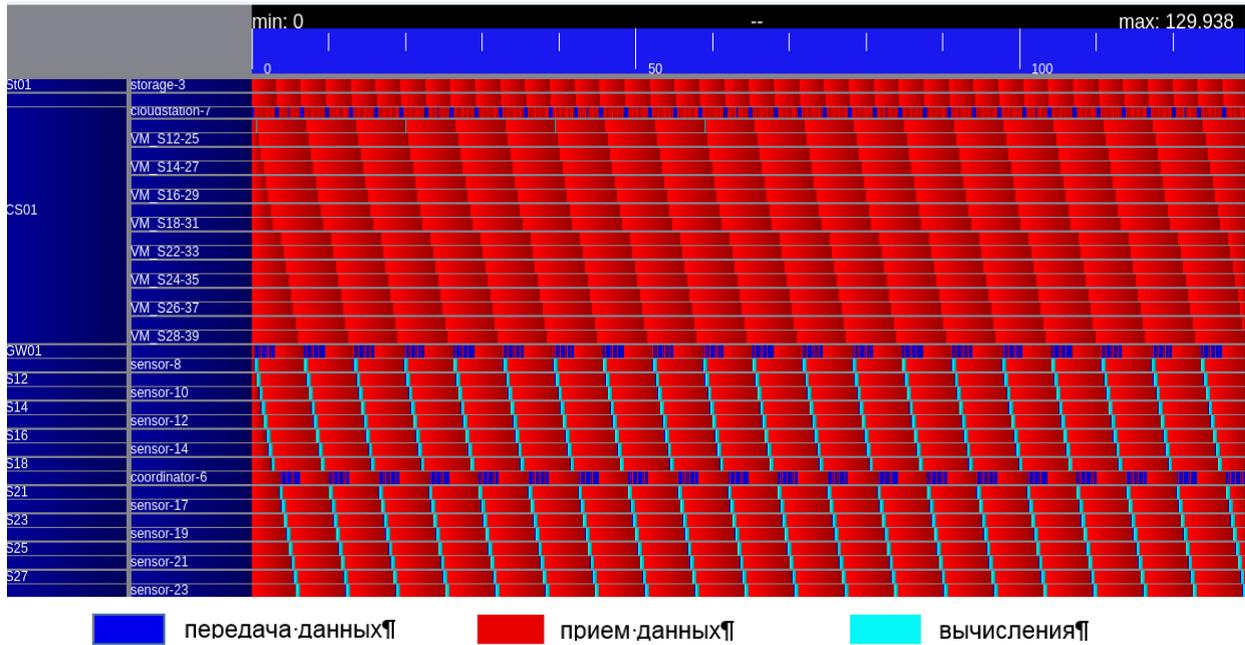


Рисунок 1 – Результаты симуляции

Синим цветом здесь показаны периоды передачи данных, красным – получения или ожидания данных, светло-голубым – вычисления. Видно, что большую часть времени все компоненты проводят в состоянии получения данных, но это скорее не получение, а ожидание, так как используются блокирующиеся операции чтения и записи в почтовые ящики. На рисунке 2 вычисления хорошо видны только у физических датчиков, оснащенных «медленными» процессорами. Видно, что вычислительные ресурсы координаторов позволяют наращивать количество физических датчиков, а серверы хранения вообще простаивают большую часть времени и в модель не включены возможные потребители данных серверов хранения и запросы к ним.

При добавлении виртуальных датчиков – виртуальных машин, с соответствием 1:1 (одному физическому датчику соответствует один виртуальный), облачная станция при этом передает данные с физического датчика на виртуальный немедленно после их получения, получена картина, представленная на рис. 3.

Виртуальные машины, представляющие виртуальные датчики, размещены на том же хосте, что и облачная станция. Это минимизирует время передачи от облачной станции к виртуальному датчику, причем поэтому важно размещать виртуальные датчики таким образом, чтобы оптимизировать общее время передачи для каждого виртуального датчика.

### Заключение

Разработанная модель является упрощенной моделью, прототипом полноценной модели облачной информационно-измерительной системы – в ней отсутствует мониторинг ресурсов облака и балансировка нагрузки (предполагающая перемещение виртуальных датчиков между серверами), упрощены и выполняются облачной станцией или вообще отсутствуют функции нескольких серверов облака (сервер управления облаком, сервер виртуализации, сервер обслуживания, сервер мониторинга датчиков, Web-

портал) [11,13], управление пользователями. При развитии модели это должно быть учтено и реализовано. Должна быть предусмотрена возможность создания виртуальных датчиков не только сингулярных (один-к одному), передающих данные без преобразования и выбора, но и селективных, аккумулирующих и агрегирующих (много-к-одному) [13]. Построение различных платформ может быть упрощено за счет создания кластеров из хостов и маршрутизаторов, которые легко комбинировать, таким образом создавая практически любые конфигурации сенсорных сетей и центров обработки данных.

В упрощенной модели операции выполняются последовательно, необходимо обеспечить параллельное выполнение, например, координатор может собирать измерения с датчиков в то время, как облачная станция взаимодействует с другим координатором, накапливать их и осуществлять пересылку на облачную станцию во время сеанса связи. Должен быть предусмотрен механизм буферизации данных, размер буфера является характеристикой хоста.

Целесообразно использование средств визуализации при задании топологии сети и набора оборудования через пользовательский Web-интерфейс, автоматизация создания файлов платформ, что особенно важно при увеличении количества компонент сети до нескольких десятков, сотен и более.

На примере представленной модели видно, что она позволяет проанализировать, будет ли надежным и эффективным сбор данных при заданных параметрах оборудования и линий связи, сразу можно проанализировать эффект от изменения параметров или включения новых единиц оборудования, изменения алгоритмов обработки данных на хостах. Возможно, при усложнении алгоритмов обработки данных придется увеличивать вычислительную мощность хоста или переносить вычисления на другой узел. В целом выбор библиотеки Simgrid для моделирования облачных информационно-измерительных систем представляется обоснованным и перспективным, с учетом возможности доработки и разработки собственных классов и сущностей.

### *Литература*

1. The GridSim Simulator. URL: <https://gridsim.hevs.ch/> (дата обращения 25.05.2019).
2. Calheiros RN, Ranjan R, Beloglazov A, De Rose CA, Buyya R. CloudSim: a toolkit for modeling and simulation of cloud computing environments and evaluation of resource provisioning algorithms. // Software: Practice and Experience. 41 (1): 23–50. doi:10.1002/spe.995. URL: <http://www.buyya.com/papers/CloudSim2010.pdf> (дата обращения 25.05.2019).
3. GreenCloud – the green cloud simulator. URL: <https://greencloud.gforge.uni.lu/> (дата обращения 25.05.2019).
4. iCanCloud. URL: <http://icancloud.org/> (дата обращения 25.05.2019).
5. Simix. URL: <https://www.windriver.com/products/simics/> (дата обращения 25.05.2019).
6. SimGrid: Versatile Simulation of Distributed Systems/ URL: <https://simgrid.org/> (дата обращения 25.05.2019).
7. Fairouz Fakhfakh, Hatem Hadj Kacem, Ahmed Hadj Kacem: Simulation tools for cloud computing: A survey and comparative study. // Proc. of the 16th International Conference

- on Computer and Information Science (ICIS) IEEE/ACIS, Wuhan, China – 2017. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7959997> (дата обращения 22/05/2019).
8. Кореньков В.В., Муравьев А.Н. Нечаевский А.В. Пакеты моделирования облачных инфраструктур // Системный анализ в науке и образовании. – 2014. – Issue 2. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23086085&> (дата обращения 25.05.2019).
  9. SimGrid Tutorials. URL: [https://simgrid.org/doc/latest/intro\\_concepts.html](https://simgrid.org/doc/latest/intro_concepts.html) (дата обращения 25.05.2019).
  10. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Вычислительная\\_мощность\\_компьютера](https://ru.wikipedia.org/wiki/Вычислительная_мощность_компьютера).
  11. Sunanda Bose, Atrayee Gupta, Sriyanjana Adhikari and Nandini Mukherjee. Towards a Sensor-Cloud Infrastructure with Sensor Virtualization // The Second Workshop for Mobile Sensing Computing and Communication) Jun 2015.
  12. Добровольский Н.С., Замай В.И., Приезжев В.А. Разработка программно-аппаратных средств базовой станции системы мониторинга параметров природной среды // Проблемы автоматизации и управления. – 2016. – №2 (30). – С. 8–14
  13. Зеленин А. Н., Власова В. А., беспроводные сенсорные сети как часть инфокоммуникационной структуры. – 2013. URL: <http://openarchive.nure.ua/bitstream/document/3521/1/Статья%20Власова.pdf> (дата обращения 25.05.2019).
  14. Гайдамако В.В. инфраструктура Sensor-Cloud – облачные информационно-измерительные системы // Проблемы автоматизации и управления. – 2018. – №2 (35). с. 109–118.
  15. URL: <http://e2e.ti.com/support/microcontrollers/msp430/f/166/t/271433?FLOPS-of-the-MSP430> (дата обращения 25.05.2019).
  16. ASRock Introduces the X10 IoT Router for Smart Homes. URL: <https://www.techpowerup.com/236163/asrock-introduces-the-x10-iot-router-for-smart-homes> (дата обращения 25.05.2019).
  17. R.G. Reed, M.A. Cox T. Wrigley B. Mellado: A CPU benchmarking characterization of ARM based processors. // Компьютерные исследования и моделирование, 2015, т. 7 №36 с.581–586. URL: [http://crm-en.ics.org.ru/uploads/crmissues/crm\\_2015\\_3/15728.pdf](http://crm-en.ics.org.ru/uploads/crmissues/crm_2015_3/15728.pdf) (дата обращения 25.05.2019)
  18. URL:<https://www.intel.com/content/dam/support/us/en/documents/processors/APP-for-Intel-Core-Processors.pdf>(дата обращения 25.05.2019).
  19. URL:<https://ichip.ru/vychislitelnaya-moshhnost.html>(дата обращения 25.05.2019).

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

---

УДК 004(075.8)

<https://doi.org/10.5281/zenodo.3253013>

*Ж.Ш. Шаршеналиев, Д.В. Янко*

*Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР*

*dmitry.yanko@gmail.com*

### ПРОБЛЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫМИ ИНФОРМАЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ С ПОМОЩЬЮ XMPP-СЕРВЕРА

В статье рассматриваются варианты интеграции информационных систем с использованием протокола XMPP, а также возможные схемы адресации для информационных систем различного назначения.

Ключевые слова: протокол XMPP; сервер сообщений; интеграция; информационная система.

**Введение.** Настаёт момент, когда практически любая информационная система нуждается во взаимодействии с другой информационной системой. Такое взаимодействие реализуется множеством хорошо известных способов (через файл, межпроцессное взаимодействие, используя сетевые протоколы: UDP, TCP, HTTP, FTP и мн. др.), применение которых обуславливается множеством факторов, среди которых удалённость или локальность систем друг относительно друга, интенсивность взаимодействия, архитектура сети передачи данных, необходимость кэширования и пр. В современных условиях часто требуется согласовать между собой гетерогенные системы (базы данных различных типов, системы электронного документооборота, системы автоматизации расчётов и пр.) в условиях гетерогенности сети передачи данных между ними (прямое подключение; одна сторона использует сетевую трансляцию адресов, другая нет; обе стороны используют сетевую трансляцию адресов; наличие в сети ограничений, накладываемых сетевыми экранами и пр.). Таким образом, задачи управления гетерогенными информационными потоками становятся достаточно сложными.

Кроме того, если требуется обеспечить взаимодействие в режиме реального времени, то многие способы взаимодействия могут стать “узким местом”. Например, взаимодействие информационных систем посредством общей базы данных (БД) влечет за собой не только накладные расходы на организацию соединений на стороне БД, но и требует от взаимодействующих сторон пристального внимания к механизму отслеживания самого взаимодействия, что приведёт не только к дефициту ресурсов на стороне БД, но и к чрезмерному расходу процессорного времени.

**Постановка задачи.** В данной статье рассматривается использование протокола XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol, Jabber) для реализации взаимодействия между гетерогенными информационными системами в условиях гетерогенности сети передачи данных.

**Общие сведения о протоколе XMPP.** XMPP – открытый, децентрализованный и расширяемый протокол обмена сообщениями (текстовые, голосовые и видео-сообщения, передача файлов) и информацией о присутствии, работающий в режиме, близком к реальному времени, реализован на базе языка XML. Протокол используется во многих крупных компаниях и проектах: WhatsApp, Facebook, Google, Яндекс, Apple, Одноклассники, ВКонтакте, Агентство национальной безопасности США и др.

XMPP в общем случае может выступать как платформа для безопасной, высокопроизводительной интеграции посредством реализации маршрутизации данных, инкапсулированных в XML-контейнеры.

Ключевые технологические возможности протокола XMPP:

1. Маршрутизация XML-потоков.
2. Шифрование каналов, используя методы организации безопасности транспортного уровня (TLS – Transport Layer Security).
3. Простая и SALS (Security Layer) аутентификация.
4. Поддержка Unicode, используя кодировку UTF-8.
5. Поддержка механизмов, реализующих проверку сетевой доступности, включая актуализацию списков контактов и двустороннюю авторизацию.

Для поддержки и разработки расширений протокола создан одноимённый портал [1], ядро протокола первоначально было описано в RFC-3920 [2] и RFC-3921 [3], впоследствии описание было актуализировано тремя стандартами: RFC-6120 [4], RFC-6121 [5] и RFC-7622 [6]. Постоянно ведётся работа по расширению функциональных возможностей протокола XMPP, в результате чего публикуются протоколы расширения (XEP – XMPP Extension Protocols). На момент написания статьи таких расширений насчитывается 410 (XEP-410) [7].

Среди расширений протокола можно выделить наиболее интересные:

1. Jingle [8–13]. Обеспечивает управление мультимедиа сессиями (голосовые и видеозвонки, передача файлов, шлюз IP-телефонии (SIP)), используя как транспортную среду протоколы TCP, UDP, RTP и даже базовый протокол XMPP сам по себе.
2. Multi-User-Chat (MUC) [14–16]. Обеспечивает доставку сообщений множественным адресатам.
3. PubSub [17–19]. Реализует механизмы оповещения об определённых событиях. Так, расширение протокола PEP (XEP-0163: Personal Eventing Protocol) [18] позволяет перевести взаимодействие между участниками коммуникации в режим реального времени.
4. BOSH [20–21]. Вводит поддержку связи поверх протокола Hypertext Transfer Protocol (HTTP).

5. Менеджер потоков (XEP-0198) [22]. Реализует доставку сообщений при нестабильном канале связи и выключенном архиве сообщений посредством использования уведомлений о доставке.
6. Дублирование сообщений (XEP-0280) [23]. Обеспечивает отправку сообщений на все подключенные устройства с одинаковыми атрибутами авторизации при условии, что не включен архив сообщений.
7. HTTP File Upload (XEP-0363) [24]. Обеспечивает передачу файлов между разными клиентами используя протокол HTTP.
8. Internet of Things (IoT) [25–33]. Обеспечивает взаимодействие между устройствами. Если сравнивать XMPP и MQTT [33], то можно отметить, что XMPP показывает лучшие результаты в случаях наличия большого количества гетерогенных клиентов.

**Архитектура XMPP.** На рис. 1 показана упрощенная компонентная архитектура протокола XMPP. XMPP-сервер в своей основе содержит маршрутизатор и менеджер сеансов. Маршрутизатор взаимодействует с XMPP-клиентами (XMPP Client 1 ... XMPP Client N) через модуль взаимодействия с клиентами (Client2Server). Сервер также взаимодействует с другими XMPP-серверами через модуль (Server2Server) взаимодействия с серверами (XMPP Server 1 ... XMPP Server P) по протоколу XMPP или с другими серверами (Сервер протокола 1 ... Сервер протокола M), работающими на протоколах, отличных от XMPP (например, Skype, ICQ, E-Mail и др.) через соответствующие адаптеры протоколов (Адаптер протокола 1 ... Адаптер протокола M). Маршрутизатор способен разрешать доменные имена, используя DNS-сервер, через модуль разрешения имён.

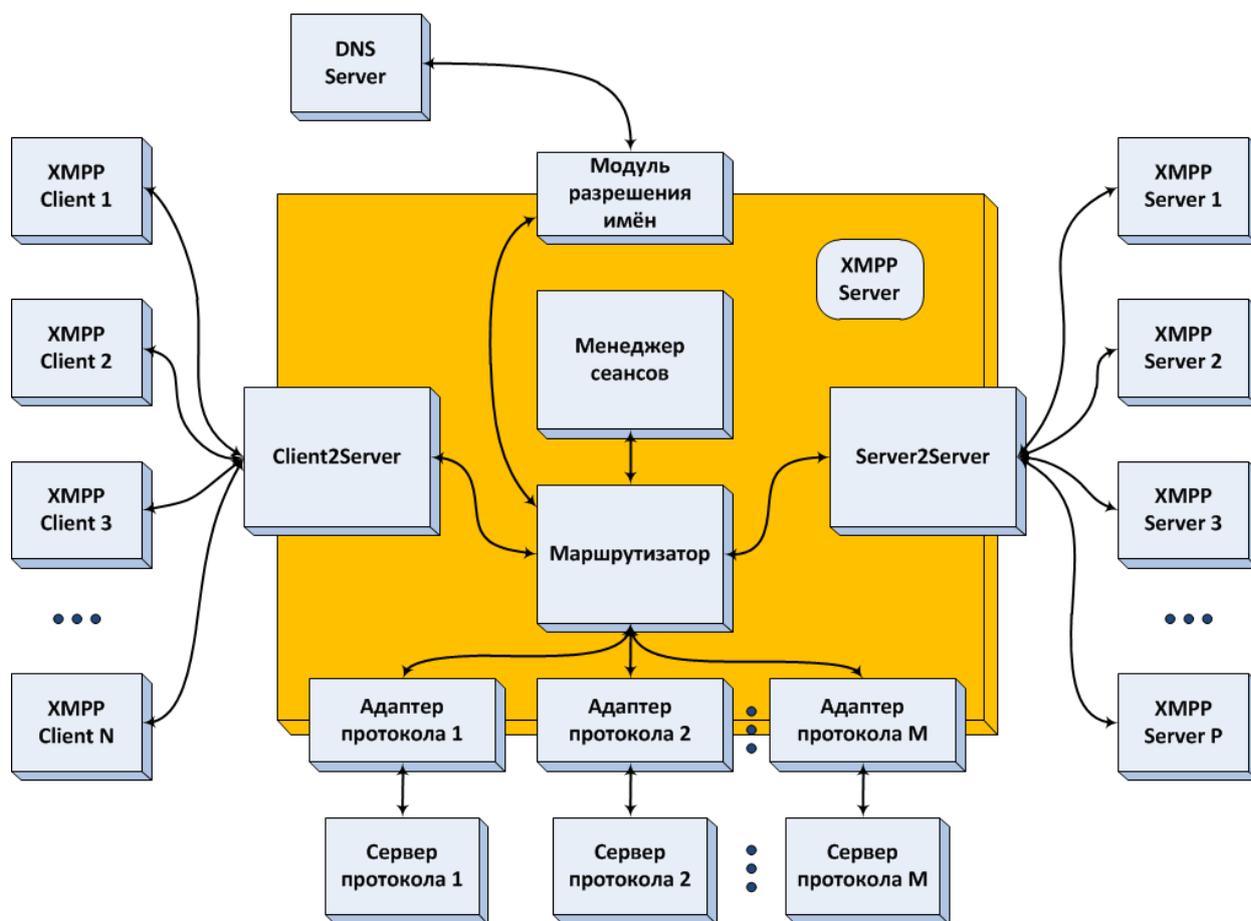
Таки образом, для целей проведения разработки и тестирования необходимы как минимум три компонента:

1. XMPP-сервер.
2. XMPP-клиент.
3. Библиотека для разработки.

**Серверное программное обеспечение.** Можно выделить следующие наиболее распространённые XMPP-серверы и операционные системы, на которых возможна инсталляция данных серверов:

1. Ejabberd (Linux, macOS, Windows) [34].
2. Prosody IM (BSD, Linux, macOS) [35].
3. MongooseIM (Linux, macOS) [36].
4. Openfire (Linux, macOS, Solaris, Windows) [37].
5. AstraChat (Linux, macOS, Solaris, Windows) [38].
6. IoT Broker (Windows) [39].
7. Isode M-Link (Linux, Windows) [40].
8. Metronome IM (Linux) [41].
9. jabberd2 (Linux) [42].

Первые четыре сервера имеют наибольшее распространение и идентичную совместимость с протоколом XMPP и необходимыми расширениями, поэтому при выборе сервера необходимо руководствоваться распространенностью языка программирования, используемого для разработки сервера, что является решающим фактором при разработке собственных расширений и интеграций. Так, для разработки Ejabberd и MongooseIM используется язык Erlang, для Prosody IM – язык Lua, а для Openfire – язык Java. Язык Java является более распространенным языком программирования, поэтому использование Openfire является более предпочтительным.



**Рисунок 1 – Упрощенная компонентная макроархитектура протокола XMPP**

**Клиентское программное обеспечение.** Клиентское ПО необходимо для тестирования взаимодействия информационных систем, а также для автоматизаций посредством подключаемых модулей (плагинов), не требующих глубокой интеграции. Ниже представлен список программного обеспечения, составленный исходя из двух критериев: распространённость и многоплатформенность (необходимый минимум: Windows и Linux).

1. Spark [43].
2. Pidgin [44].
3. Psi [45].
4. Psi+ [46].
5. AstraChat [47].

6. Gajim [48].
7. Jitsi Desktop [49].
8. OneTeam [50].
9. Swift [51].

Всё представленное выше программное обеспечение зарекомендовало себя как надёжное и в основном открытое. Особенно следует отметить, что Spark является проектом с открытыми исходными текстами, разработан на языке Java и является разработкой той же компании – Ignite Realtime, что и Openfire. Особо следует подчеркнуть, что данный клиент может быть очень глубоко адаптирован для различных вариантов использования [52]. Для этого выполняется редактирование файла `spark.jar/org/jivesoftware/resource/default.properties`. Ниже перечислены некоторые параметры, имеющие практическую значимость:

1. Имя сервера (`HOST_NAME = 10.0.0.3`).
2. Запрет пользователям изменять имя сервера (`HOST_NAME_CHANGE_DISABLED = true`).
3. Запрет создания новых учетных записей (`ACCOUNT_DISABLED = true`).
4. Запрет доступа к дополнительным настройкам (`ADVANCED_DISABLED = true`).
5. Отключение возможности обновления (`DISABLE_UPDATES = true`).
6. Размер выдачи предупреждения при передаче (`FILE_TRANSFER_WARNING_SIZE = 10485760 - 10 МБ, -1 - нет ограничений`).
7. Максимальный размер файла при передаче (`FILE_TRANSFER_MAXIMUM_SIZE = 20971520`).
8. Отключение возможности добавления новых контактов (`ADD_CONTACT_DISABLED = true`).
9. Отключение возможности добавления новых групп (`ADD_CONTACT_GROUP_DISABLED = true`).
10. Запрет изменения пароля (`CHANGE_PASSWORD_DISABLED = true`).
11. Отключение возможности установки плагинов (`INSTALL_PLUGINS_DISABLED = true`).
12. Отключение возможности удаления плагинов (`DEINSTALL_PLUGINS_DISABLED = true`).

**Библиотеки для разработки программного обеспечения.** Для более глубокой интеграции используются библиотеки для разработки, реализующие открытый интерфейс разработки приложений (API – Application Programming Interface). Ниже представлен список наиболее распространённых библиотек для разных языков программирования (указан в скобках):

1. iksemel (C) [53].
2. Swiften (C++) [54].
3. Smack (Java) [55].
4. Waher Networking (C#) [56].

5. Tjabberclient (Delphi) [57].
6. Net-XMPP (Perl) [58].
7. xmpphp (PHP) [59].
8. Strophe.js (JavaScript) [60].
9. slxmpp (Python) [61].
10. Erlang/Elixir XMPP (Erlang) [62].

## Адресация

Каждый XMPP-адрес (Jabber ID, JID) может содержать имя пользователя, доменное имя сервера и ресурс. Ресурсы используются для создания нескольких независимых подключений для одного и того же пользователя. Адреса могут быть заданы как минимум в четырёх формах (рис. 2): в полной форме (а), в базовой форме (б), в минимальной форме с ресурсом (в) и в минимальной форме (г). Минимальные формы используются для системных сообщений и для контроля специальных возможностей на сервере.

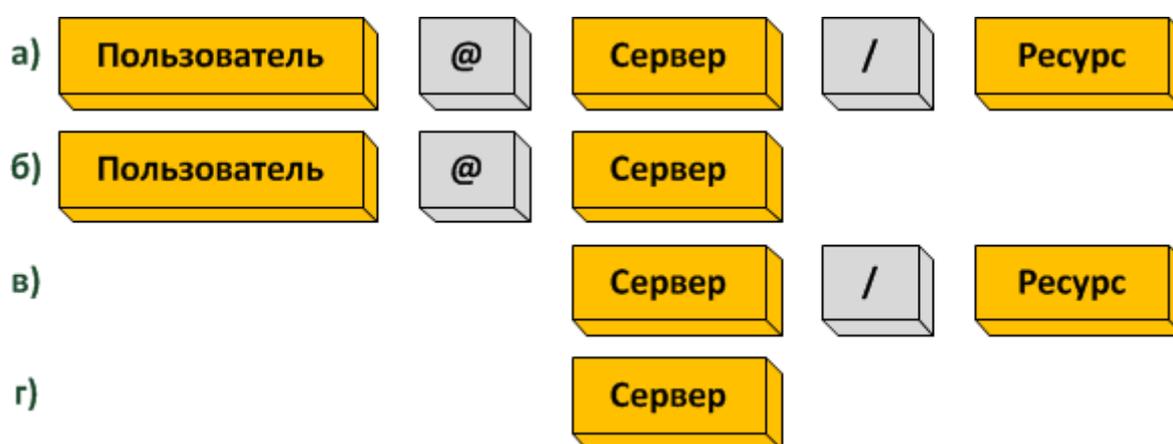


Рисунок 2 – Структура адреса в протоколе XMPP

**Управление гетерогенными информационными потоками.** Для управления гетерогенными информационными потоками посредством единого XMPP-сервера хорошо подходит полная форма адресации, в которой в качестве пользователя используется система, а в качестве ресурса – подсистема (рис. 3).

В качестве примера рассмотрим возможную модель адресации (рис. 4), применяемую для интеграции трёх систем: корпоративной системы электронного документооборота (**edo**), корпоративной системы инвентаризации сетевого оборудования (**inventory**) и корпоративной системы мониторинга (**monitoring**) посредством общего XMPP-сервера (**xmpp.org.kg**). Для обозначенных выше систем выбраны соответствующие идентификаторы: *edo*, *inventory* и *monitoring*.

Для электронного документооборота в качестве идентификаторов подсистем выбраны системные идентификаторы пользователей с префиксом "emp\_" (*emp\_000001* – *emp\_N*); в качестве примера результат наложения идентификаторов на выбранную модель адресации (рис. 3) показан на рис. 5.

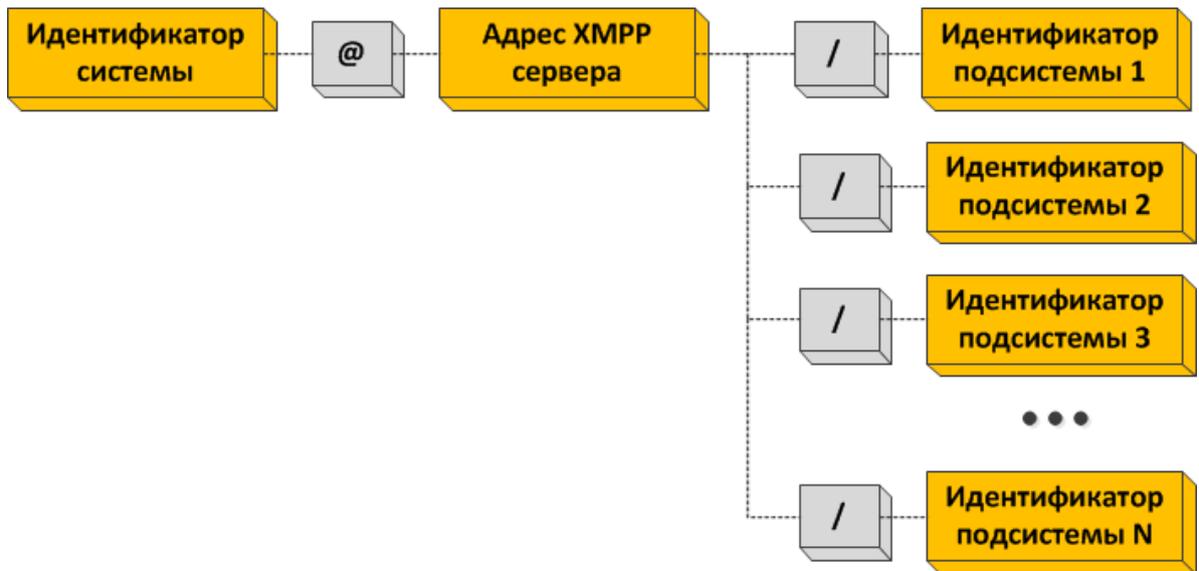


Рисунок 3 – Межсистемная и внутрисистемная адресации

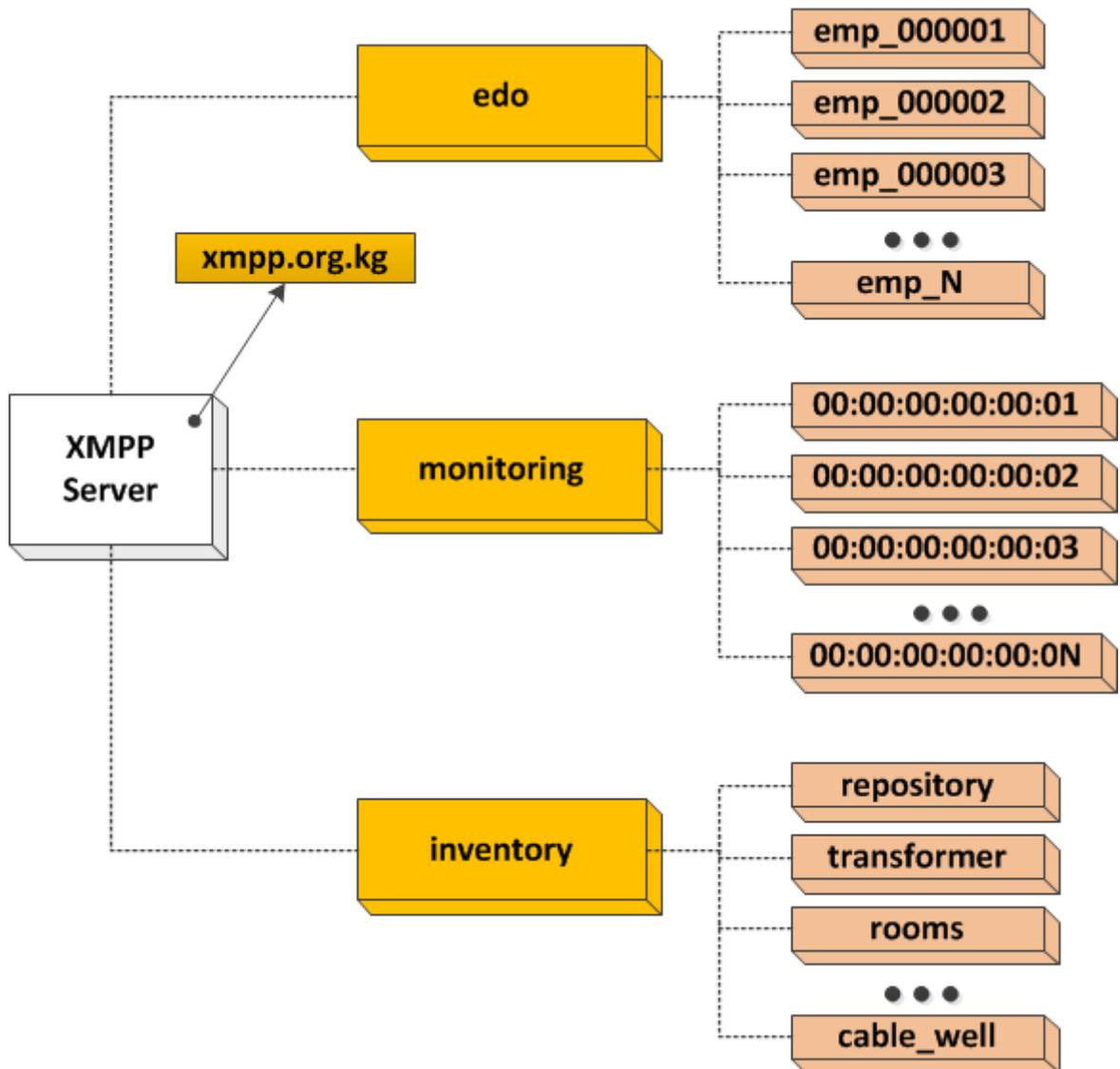


Рисунок 4 – Пример интеграции различных систем

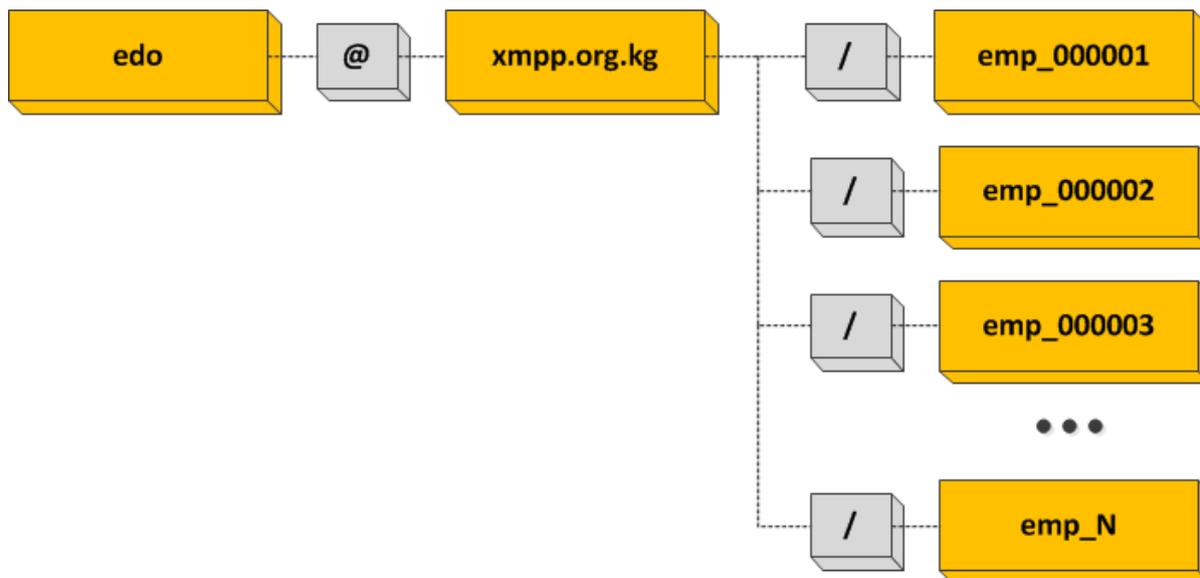


Рисунок 5 – Пример адресации для системы электронного документооборота

Таким образом, для корпоративной системы инвентаризации в качестве идентификаторов подсистем могут быть использованы MAC-адреса устройств, а для системы мониторинга – идентификаторы объектов наблюдения (repository – хранилище, transformer – трансформатор, rooms – технологическое помещение, cable\_well – кабельный колодец).

### *Литература*

1. XMPP Main. <https://xmpp.org> (дата обращения: 30.03.2019).
2. RFC 3920 - Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP): Core. <https://tools.ietf.org/html/rfc3920> (дата обращения: 30.03.2019).
3. RFC 3921 - Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP): Instant Messaging and Presence. <https://tools.ietf.org/html/rfc3921> (дата обращения: 30.03.2019).
4. RFC 6120 - Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP): Core. <https://tools.ietf.org/html/rfc6120> (дата обращения: 30.03.2019).
5. RFC 6121 - Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP): Instant Messaging and Presence. <https://tools.ietf.org/html/rfc6121> (дата обращения: 30.03.2019)
6. RFC 7622 - Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP): Address Format. <https://tools.ietf.org/html/rfc7622> (дата обращения: 30.03.2019).
7. XMPP | Specifications. <https://xmpp.org/extensions/> (дата обращения: 30.03.2019)
8. XEP-0166: Jingle. <https://xmpp.org/extensions/xep-0166.html> (дата обращения: 30.03.2019).
9. XEP-0167: Jingle RTP Sessions. <https://xmpp.org/extensions/xep-0167.html> (дата обращения: 30.03.2019).
10. XEP-0176: Jingle ICE-UDP Transport Method. <https://xmpp.org/extensions/xep-0176.html> (дата обращения: 30.03.2019).
11. XEP-0177: Jingle Raw UDP Transport Method. <https://xmpp.org/extensions/xep-0177.html> (дата обращения: 30.03.2019).

12. XEP-0181: Jingle DTMF. <https://xmpp.org/extensions/xep-0181.html> (дата обращения: 30.03.2019).
13. XEP-0234: Jingle File Transfer. <https://xmpp.org/extensions/xep-0234.html> (дата обращения: 30.03.2019).
14. XEP-0045: Multi-User Chat. <https://xmpp.org/extensions/xep-0045.html> (дата обращения: 30.03.2019).
15. XEP-0249: Direct MUC Invitations. <https://xmpp.org/extensions/xep-0249.html> (дата обращения: 30.03.2019)
16. XEP-0272: Multiparty Jingle. <https://xmpp.org/extensions/xep-0272.html> (дата обращения: 30.03.2019).
17. XEP-0060: Publish-Subscribe. <https://xmpp.org/extensions/xep-0060.html> (дата обращения: 30.03.2019).
18. XEP-0163: Personal Eventing Protocol. <https://xmpp.org/extensions/xep-0163.html> (дата обращения: 30.03.2019).
19. XEP-0248: PubSub Collection Nodes. <https://xmpp.org/extensions/xep-0248.html> (дата обращения: 30.03.2019).
20. XEP-0124: Bidirectional-streams Over Synchronous HTTP. <https://xmpp.org/extensions/xep-0124.html> (дата обращения: 30.03.2019)
21. XEP-0206: XMPP Over BOSH. <https://xmpp.org/extensions/xep-0206.html> (дата обращения: 30.03.2019)
22. XEP-0198: Stream Management. <https://xmpp.org/extensions/xep-0198.html> (дата обращения: 30.03.2019).
23. XEP-0280: Message Carbons. <https://xmpp.org/extensions/xep-0280.html> (дата обращения: 30.03.2019).
24. XEP-0363: HTTP File Upload. <https://xmpp.org/extensions/xep-0363.html> (дата обращения: 30.03.2019).
25. Internet of Things (IoT). <https://xmpp.org/uses/internet-of-things.html> (дата обращения: 30.03.2019).
26. XMPP-IoT. <http://www.xmpp-iot.org/> (дата обращения: 30.03.2019).
27. XEP-0322: Efficient XML Interchange (EXI) Format. <https://xmpp.org/extensions/xep-0322.html> (дата обращения: 30.03.2019).
28. XEP-0323: Internet of Things – Sensor Data. <https://xmpp.org/extensions/xep-0323.html> (дата обращения: 30.03.2019).
29. XEP-0324: Internet of Things – Provisioning. <https://xmpp.org/extensions/xep-0324.html> (дата обращения: 30.03.2019).
30. XEP-0325: Internet of Things – Control. <https://xmpp.org/extensions/xep-0325.html> (дата обращения: 30.03.2019).
31. XEP-0326: Internet of Things – Concentrators. <https://xmpp.org/extensions/xep-0326.html> (дата обращения: 30.03.2019).
32. XEP-0347: Internet of Things – Discovery. <https://xmpp.org/extensions/xep-0347.html> (дата обращения: 30.03.2019).
33. XMPP: IoT protocol winner, or second place to MQTT? <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/feature/XMPP-IoT-protocol-winner-or-second-place-to-MQTT> (дата обращения: 30.03.2019).

34. ejabberd. <https://www.process-one.net/en/ejabberd> (дата обращения: 30.03.2019)
35. Prosody IM. <http://prosody.im/> (дата обращения: 30.03.2019).
36. MongooseIM. <https://www.erlang-solutions.com/products/mongooseim.html> (дата обращения: 30.03.2019).
37. Openfire. <https://www.igniterealtime.org/projects/openfire/> (дата обращения: 30.03.2019).
38. AstraChat. <http://www.astrachat.com/HostedForBusiness.aspx> (дата обращения: 30.03.2019).
39. IoT Broker. <https://waher.se/Broker.md> (дата обращения: 30.03.2019).
40. Isode M-Link. <https://isode.com/products/m-link.html> (дата обращения: 30.03.2019).
41. Metronome IM. <https://metronome.im/> (дата обращения: 30.03.2019).
42. jabberd2. <http://jabberd2.org/> (дата обращения: 30.03.2019).
43. Spark. <https://igniterealtime.org/projects/spark/> (дата обращения: 30.03.2019).
44. Pidgin. <http://pidgin.im/> (дата обращения: 30.03.2019).
45. Psi. <http://psi-im.org/> (дата обращения: 30.03.2019)
46. Psi+. <https://psi-plus.com/> (дата обращения: 30.03.2019).
47. AstraChat. <http://astrachat.com/> (дата обращения: 30.03.2019).
48. Gajim. <http://www.gajim.org/> (дата обращения: 30.03.2019).
49. Jitsi Desktop. <http://desktop.jitsi.org/> (дата обращения: 30.03.2019).
50. OneTeam. <http://oneteam.im/> (дата обращения: 30.03.2019).
51. Swift. <https://swift.im/> (дата обращения: 30.03.2019).
52. Тонкая настройка IM-клиента Spark. <https://habr.com/post/253011/> (дата обращения: 30.03.2019).
53. Iksemel. <https://github.com/meduketto/iksemel> (дата обращения: 30.03.2019).
54. Swiften. <https://swift.im/swiften.html> (дата обращения: 30.03.2019).
55. Smack. <https://www.igniterealtime.org/projects/smack> (дата обращения: 30.03.2019).
56. Waher Networking. <https://waher.se/IoTGateway/Libraries.md#networking> (дата обращения: 30.03.2019).
57. Tjabberclient. <https://sourceforge.net/projects/tjabberclient/> (дата обращения: 30.03.2019).
58. Net-XMPP. <https://metacpan.org/release/HACKER/Net-XMLPP-1.02> (дата обращения: 30.03.2019).
59. Xmpphp. <https://code.google.com/archive/p/xmpphp/> (дата обращения: 30.03.2019).
60. Strophe.js. <http://strophe.im/strophejs> (дата обращения: 30.03.2019).
61. Slixmpp. <https://lab.louiz.org/poezio/slixmpp> (дата обращения: 30.03.2019).
62. Erlang/Elixir XMPP. <https://github.com/processone/xmpp> (дата обращения: 30.03.2019).

*Н. Б. Толпинская*, nbtol@mail.ru,  
*А. М. Сычев*, windmill5667@gmail.com  
 МГТУ им. Баумана, Россия

## АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ПОТОКОВЫХ ДАННЫХ

Приведен краткий обзор некоторых основных алгоритмов потоковой обработки данных. Рассмотрены алгоритмы нахождения числа различных элементов потока (алгоритм Флажолле-Мартина, различные варианты LogLog алгоритма), нахождение частот элементов потока (алгоритм Мисра-Грайса), поиск преобладающего элемента потока (алгоритм Бойера – Мура), проверка принадлежности заданного элемента потоку (фильтр Блума), поиск медианы потока (алгоритм Мунро-Патерсона). Уделяется внимание преимуществам и недостаткам потоковых алгоритмов. Приводятся основные их характеристики. Описаны основные задачи, решаемые с помощью данных алгоритмов. Большинство алгоритмов содержат детальное описание. Для более полного и точного понимания некоторые алгоритмы приводятся полностью (на алгоритмическом языке).

**Ключевые слова:** потоковая обработка; потоковые алгоритмы; большие данные.

**Введение.** Количество окружающих нас данных ежегодно увеличивается в сотни раз благодаря появлению новых источников данных в сети Интернет. Само существование большого числа всевозможных предприятий зависит от умения обрабатывать потоки данных и принимать управленческие решения на основе анализа этих данных. К потоковым данным можно отнести файлы журналов, сформированных клиентами при использовании мобильных или интернет-приложений, покупки в интернет-магазинах, информация из социальных сетей и т.д. Обработка потоковых данных подразумевает обработку больших данных, происходящую в режиме, близком к реальному времени.

Далее рассмотрим алгоритмы потоковой обработки данных и дадим им сравнительную оценку.

*Основные понятия.*

Базовой задачей потоковой обработки данных является вычисление некоторой функции  $F$  от «большого» входящего потока  $a=(a_1, a_2, \dots, a_m)$ , где элементы последовательности (токены) берутся из некоторого универсального множества  $[n]=\{1, 2, \dots, n\}$ . Числа  $m$  (длина потока) и  $n$  (мощность универсального множества) являются важнейшими параметрами потока. При этом необходимо использовать малое количество доступной памяти  $s$  (в битах) [1].

Поскольку  $m, n$  – считаются «большими» числами, то хотелось бы, чтобы  $s$  было намного меньше, например:

$$s=O(\min(m, n)).$$

Или, еще лучше:

$$s=O(\log(m)+\log(n)).$$

Рассмотрим алгоритмы, которые проходят по потоку  $p$  раз, где  $p$  – небольшое натуральное число, в идеале  $p = 1$  [2].

Как правило, целевая функция  $F$  является функцией действительной переменной.

Большинство алгоритмов вычисляет  $F$  приближенно вследствие ограничений на память  $s$  и продолжительность времени обработки.

Основными характеристиками поточных алгоритмов являются [3]:

- число  $p$  допустимых проходов алгоритма над данными;
- доступная память  $s$ ;
- время обработки;
- точность.

Поточные алгоритмы имеют большое значение в задачах мониторинга и управления компьютерными сетями, например их средствами, возможно оперативное предотвращение переполнений (отслеживание гигантских потоков, оценка числа и ожидаемой длительности переполнений). Также поточные алгоритмы могут применяться в базах данных, например, для оценки их размера после операции соединения таблиц, задачах машинного обучения, задачах на графах и др.

Основные классы задач, решаемые потоковыми алгоритмами [1]:

- поиск наиболее часто встречающегося элемента в потоке данных;
- нахождение частот элементов потока;
- подсчет числа уникальных элементов;
- задачи машинного обучения (за один проход потока).

### 1. Оценка числа различных элементов потока

Постановка задачи: имеется поток  $a=(a_1, a_2, \dots, a_m)$ . Пусть  $f=(f_1, f_2, \dots, f_m)$  – вектор частот элементов потока и  $d$  – число различных элементов в  $a$ . Оценить величину  $d$ .

Эта задача возникает в некоторых областях data-mining, в задачах оптимизации запросов к базам данных, в анализе трафика маршрутизаторов.

Первым таким алгоритмом является алгоритм Флажолле-Мартина [4, 5]. Время его выполнения –  $O(n)$ , при этом требуется  $O(\log(m))$  памяти. Заметим, что при прямом переборе требуется  $O(m)$  памяти. Это приближенный алгоритм, который также вычисляет стандартное отклонение и максимальную погрешность, а также использует в своей работе хэш-функции.

Слабым местом этого алгоритма является то, что результаты его выполнения могут сильно отличаться. Стандартным решением данной проблемы есть  $k$ -кратный запуск алгоритма с  $k$  различными случайными хэш-функциями и объединение полученных результатов. Обычным является взятие среднего значения из  $k$  полученных результатов и принятие его за количество различных элементов потока (мощность так называемого мультимножества). Но, как хорошо известно, среднее значение является довольно чувствительным к выбросам [6].

Другим подходом является взятие вместо среднего из  $k$  полученных результатов их медианы. Напомним, что медиана выборки данных – это такое значение, которое делит эту выборку пополам – данные из одной половины имеют значение не меньше медианы, а из второй – не больше. Ценность её заключается в том, что её значение намного менее чувствительно к выбросам, которые могут очень сильно повлиять на среднее. Но тут проблема в том, что медиана будет иметь только такой вид  $\frac{2^R}{\phi}$ , где

$\phi \approx 0,7735$  – коэффициент корреляции,  $R$  – целое число.

Выходом из данной ситуации может быть объединение двух предыдущих подходов, т.е. среднего и медианы. А именно, создаем  $k \cdot l$  хэш-функций и разбиваем их на  $k$  непересекающихся групп размера  $l$ . В каждой группе ищем медиану полученных  $l$  результатов, затем берем среднее из  $k$  полученных медиан [7].

Улучшением подхода Флажолле-Мартина являются различные разновидности алгоритмов LogLog.

Алгоритм LogLog [6] для своей работы требует очень маленький объем дополнительной памяти, а именно  $r$  единиц памяти, где единица памяти – так называемый «малый байт» – составляет около  $\log \log N_{\max}$  бит, где  $N_{\max}$  – априорная верхняя оценка количества различных элементов потока.

Относительная точность оценки составляет около  $1,05/\sqrt{m}$  для (лучшей) версии алгоритма Super-LogLog. Например, оценка для  $N_{\max} = 2^{27}$  (сотня миллионов различных элементов в потоке данных) может быть достигнута при  $r = 2048$  единиц памяти по 5 бит каждая единица, что соответствует 1,28 килобайт дополнительной памяти. При этом наблюдаемая ошибка не превышает 2,5 %. При этом алгоритм требует всего лишь одного прохода.

В алгоритме **HyperLogLog** используются не сами данные, а их хэш-значения [9, 5]. При таком подходе очень важно выбирать подходящую хэш-функцию. Она должна быть не случайной, а детерминированной: для одинаковых входных значений одинаковыми должны быть выходные значения и при этом давать равномерное распределение.

В HyperLogLog алгоритме к каждому элементу исходного мультимножества применяется хэш-функция. Таким образом получается новое мультимножество равномерно распределенных случайных чисел и имеющее ту же мощность, что и исходное мультимножество.

Результаты алгоритма HyperLogLog, как и алгоритма Флажолле-Мартина, имеют значительный разброс. Для решения этого вопроса было предложено разбивать исходное мультимножество на большое количество подмножеств, запускать алгоритм для каждого подмножества и объединять результаты с помощью среднего гармонического (обратная величина среднего обратных величин).

Относительная погрешность данного алгоритма  $\varepsilon = 1,04/\sqrt{m}$ , а требуемая память  $O\left(\frac{\log \log n}{\varepsilon^2} + \log n\right)$ .

В улучшенной версии HyperLogLog++ присутствуют такие усовершенствования.

Во-первых, использование 64-битных хэш-функций вместо 32-битных. Это позволяет избежать выполнения корректировок при переполнениях разряда.

Во-вторых, вследствие того, что при небольших мощностях множества наблюдаются некоторые смещения, то была предложена корректировка этих смещений на основе экспериментальных данных.

В-третьих, использование метода хранения разреженных данных. Ясно, что результатом этого усовершенствования является экономия памяти.

## 2. Нахождения частот элементов потока

Здесь рассмотрим детерминированный алгоритм Мисра-Грайса [10].

Постановка задачи: имеется поток  $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ ,  $a_i \in [n]$ . Тогда однозначно определен вектор частот элементов потока  $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)$ . При этом  $f_1 + f_2 + \dots + f_n = m$ .

Найти такой номер  $j$ , если он существует, для которого  $f_j > \frac{m}{2}$ .

Обобщением последней задачи является задача нахождения частот с параметром  $k$ : найти такой номер  $j$ , если он существует, что  $f_j > \frac{m}{k}$ .

Программная реализация алгоритма Мисра-Грайса:

Initialize: (empty associative array);

Process  $j$

If  $j \in \text{keys}(A)$  then

$A[j] := A[j + 1];$

Else if  $|\text{keys}(A)| < k - 1$  then

$A[j] := 1;$

Else

For each  $l \in \text{keys}(A)$  do

$A[l] := A[l - 1];$

If  $A[l] = 0$  then remove  $l$  from  $A$

Output: On query  $a$ , if  $a \in \text{keys}(A)$ , then  $\overline{f}_a = A[a]$ , else  $\overline{f}_a = 0$ .

Основное свойство данного алгоритма состоит в том, что при одном проходе и используя  $O(k(\log m + \log n))$  бит памяти для любого токена  $j$  для оценки частоты  $\overline{f}_j$

выполнено неравенство  $f_j - \frac{m}{k} < \overline{f}_j < f_j$ .

Применяя дополнительный (второй) проход по входному потоку, используя данный алгоритм, можно решить задачу нахождения частот.

### 3. Задача поиска преобладающего элемента в потоке данных

**Алгоритм большинства голосов Бойера – Мура.** Данный алгоритм позволяет находить преобладающий элемент последовательности. Преобладающим элементом последовательности длины  $n$  называется такой элемент этой последовательности, который встречается в ней более чем  $n/2$  раз. Сложность данного алгоритма  $O(n)$ , а требуемая дополнительная память –  $O(1)$  [11].

Алгоритм требует введения двух дополнительных переменных: первая, `majority_element`, будет содержать элемент последовательности, который является наиболее подходящим на роль преобладающего элемента из уже рассмотренных, а вторая, `counter`, является счётчиком и изначально равна нулю. Алгоритм состоит из единственного прохода по рассматриваемой последовательности. На каждом шаге выполняются следующие действия: если текущее значение переменной-счётчика равно нулю, то данный элемент последовательности записывается в первую переменную, а счётчик становится равен 1. Если же значение счётчика отлично от нуля, то текущий элемент

последовательности сравнивается со значением, записанным в первую переменную. Если они совпадают, то счётчик увеличивается на 1, иначе – уменьшается на 1.

```

counter := 0
For each  $i \in [1, n]$  ::
  If counter = 0 then:
    majority_element :=  $a_i$ 
    counter := 1
  Else if  $a_i = \text{majority\_element}$ :
    counter := counter + 1
  Else:
    counter := counter - 1
Output: majority_element

```

После рассмотрения всех элементов в первой переменной будет содержаться преобладающий элемент последовательности, если таковой существует. Однако если такого элемента в последовательности нет, то первая переменная всё равно будет содержать некоторый элемент последовательности.

Поэтому, если уверенности в существовании преобладающего элемента нет, то следует выполнить дополнительный проход по массиву, чтобы убедиться, что найденный элемент в массиве встречается более чем  $n/2$  раз. Если в результате второго прохода окажется, что элемент встречается не более  $n/2$  раз, то последовательность преобладающего элемента не содержит.

Преимуществом данного алгоритма является то, что он требует для своего выполнения всего лишь один проход. Недостаток – возможна ошибка, если преобладающего элемента в потоке не существует.

#### 4. Поиск $t$ -спанера для графа

$t$ -спанер графа – это разреженный подграф заданного графа, который сохраняет приблизительное расстояние между каждой парой вершин. Вычисление  $t$ -спанера наименьшего размера для заданного графа является актуальной комбинаторной задачей, имеющей многочисленные приложения в самых разных областях. Известно, что поиск  $t$ -спанера графа является NP-полной задачей.

Файгенбаум [12] построил первый потоковый алгоритм для нахождения спанера графа. Для любого  $k \in \mathbb{N}$  алгоритм за один проход вычисляет  $(2k+1)$ -спанер размера  $O(kn^{1+1/k})$  и требует  $\Theta(k^2 n^{1/k})$  времени обработки на ребро. Следует заметить, что вычисленный таким образом размер спанера далек от предполагаемой оптимальной его оценки  $\Theta(kn^{1+1/k})$ .

Суренда Басваном [13] был предложен алгоритм, который требует постоянного (не зависящего от размера) времени обработки одного ребра. Этот алгоритм находит  $(2k-1)$ -спанера размера  $O(kn^{1+1/k})$ .

Важным является то, что один проход по потоку и  $O(m)$  время обработки – это лучшее на что можно надеяться.

### 5. Проверка принадлежности конкретного элемента потоку. Фильтр Блума

Вероятностным множеством называется структура данных, способная добавлять элемент в множество, а также выполнять запросы проверки принадлежности элемента множеству. При этом существует возможность получить или положительный, но неопределенный ответ (элемента в множестве нет, но структура данных сообщает, что он есть), или отрицательный определенный ответ (элемент точно не содержится в данном множестве).

Фильтр Блума [11, 14] представляет собой реализацию такого вероятностного множества, а также позволяет компактно хранить элементы и проверять принадлежность заданного элемента к множеству. При этом существует возможность получить ложноположительное срабатывание (элемента в множестве нет, но алгоритм показывает, что он есть), но не ложноотрицательное.

Данный алгоритм может использовать любой объём памяти, заранее заданный пользователем, причем чем он больше, тем меньше вероятность ложного срабатывания. Поддерживается операция добавления новых элементов в множество, но не удаления существующих (если только не используется модификация со счётчиками).

Фильтр Блума представляет собой битовый массив из  $m$  бит и  $k$  различных хеш-функций  $h_1, \dots, h_k$ , равновероятно отображающих элементы исходного множества во множество  $0, 1, \dots, m-1$ , соответствующее номерам битов в массиве. Изначально, когда структура данных хранит пустое множество, все  $m$  бит обнулены.

Для добавления элемента  $s$  необходимо записать единицы на каждую из позиций  $h_1(s), \dots, h_k(s)$  битового массива.

Чтобы проверить, что элемент  $s$  принадлежит множеству хранимых элементов, необходимо проверить состояние  $h_1(s), \dots, h_k(s)$ . Если хотя бы один из них равен нулю, элемент не принадлежит множеству. Если все они равны единице, то структура данных сообщает, что элемент принадлежит множеству. При этом может возникнуть две ситуации: либо элемент действительно принадлежит к множеству, либо все эти биты оказались установлены при добавлении других элементов, что и является источником ложных срабатываний в этой структуре данных.

По сравнению с хеш-таблицами, фильтр Блума может обходиться на несколько порядков меньшими объёмами памяти, жертвуя при этом детерминизмом.

Ложноположительное срабатывание происходит тогда, когда для несуществующего элемента все  $k$  бит окажутся ненулевыми, и фильтр Блума ответит, что он входит в число вставленных элементов [11]. Тогда вероятность такого события равна:

$$\left(1 - \exp\left(-\frac{kn}{m}\right)\right)^k.$$

Для фиксированных  $m$  и  $n$  оптимальное число хеш-функций  $k$ , минимизирующее вероятность ложноположительного срабатывания, равно:

$$k \approx \ln 2 \frac{m}{n}.$$

Чем больше размер множества, тем меньше вероятность получить некорректный ответ на запрос о наличии какого-либо элемента.

### **6. Поиск медианы. Алгоритм Мунро-Патерсона**

Данный алгоритм позволяет находить  $r$ -тый по величине элемент потока длины  $m$ . В том числе, как частный случай, медиану потока [15].

Мунро и Патерсон установили связь между количеством  $p$  проходов по потоку и необходимым объемом памяти, требуемой для нахождения медианы. А именно:

$$O(m^p \log^{2-\frac{1}{p}} m \log n).$$

Таким образом, если необходимо найти медиану за один проход, то алгоритму Мунро-Патерсона потребуется  $O(m \log n)$  памяти.

На данный момент появились усовершенствования этого алгоритма (Guha-McGregor) [16].

**Заключение.** Таким образом, можно увидеть четкую разницу между требованиями, предъявляемыми к алгоритмам для потоковой обработки данных и «обычным» алгоритмам. Во-первых – это количество обращений к потоковым данным (число проходов по потоку); во-вторых – это время выполнения (сложность) алгоритма; в-третьих – это объем используемой алгоритмом памяти.

Для достижения этих характеристик приходится чем-то жертвовать, искать некую «золотую середину». Ярким подтверждением этого факта является алгоритм Мунро-Патерсона поиска медианы, в котором объем памяти находится в обратной зависимости от количества проходов.

При этом нужно также учитывать, что многие потоковые алгоритмы являются вероятностными, например, алгоритмы серии LogLog, для оценки числа различных элементов потока, и фильтры Блума, для проверки принадлежности элемента потоку, и др. Т.е. результат выполнения этих алгоритмов не является 100%-но достоверным или абсолютно точным с математической точки зрения.

Но при решении многих прикладных вопросов абсолютная точность и не требуется, тем более при решении задач в условиях потоковой обработки данных. Ей можно пожертвовать для уменьшения требуемой памяти, использовать лишь один проход по данным и времени выполнения самого алгоритма. Например, алгоритм Бойера-Мура может использовать лишь один проход по потоку, зная при этом априори о существовании преобладающего элемента. Если же такой информации о существовании нет, то придется использовать два прохода.

Следует также отметить, что существует немало разработанных поточных алгоритмов для решения описанных выше задач, которые не опубликованы в литературе ввиду того, что представляют собой коммерческую тайну. Заказчиками таких алгоритмов являются, как правило, крупные IT компании.

### Литература

1. S. Muthu Muthukrishnan. Data Streams: Algorithms and Applications, 2009.
2. Atish Das Sarma, Richard J. Lipton, and Danupon Nanongkai. Best-order streaming model. In Proceedings of TAMC'09, 2009.
3. Graham Cormode and S. Muthukrishnan. An improved data stream summary: the count-min sketch and its applications. *J. Alg.*, 55(1):58–75, 2005. Preliminary version in Proc. 6th Latin American Theoretical Informatics Symposium, pages 29–38, 2004.
4. P. Flajolet and G. N. Martin. Probabilistic counting algorithms for data base applications. *Journal of Computer and System Sciences*, 31, 1985, pp. 182–209.
5. Bar-Yossef, Ziv; Jayram, T. S.; Kumar, Ravi; Sivakumar, D.; Trevisan, Luca (2002-09-13). Counting Distinct Elements in a Data Stream. *Randomization and Approximation Techniques in Computer Science. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 1–10.
6. Moses Charikar, Kevin Chen, and Martin Farach-Colton. Finding frequent items in data streams. *Theor. Comput. Sci.*, 312(1):3–15, 2004.
7. Lakshminath Bhuvanagiri, Sumit Ganguly, Deepanjan Kesh, and Chandan Saha. Simpler algorithm for estimating frequency moments of data streams. In Proc. 17th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, pages 708–713, 2006.
8. Kane, Daniel M.; Nelson, Jelani; Woodruff, David P. (2010). "An optimal algorithm for the distinct elements problem" (PDF). Proceedings of the twenty-ninth ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART symposium on Principles of database systems of data - PODS '10. p. 41. doi:10.1145/1807085.1807094. ISBN 978-1-4503-0033-9. Retrieved 2016-12-11.
9. J. Ian Munro and Mike Paterson. Selection and sorting with limited storage. *TCS*, 12:315–323, 1980. Preliminary version in Proc. 19th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, pages 253–258, 1978.
10. S. Halperin and U. Zwick. Linear time deterministic algorithm for computing spanners for unweighted graphs. unpublished manuscript, 1996.
11. T.S. Jayram, A. McGregor, S. Muthukrishnan, and E. Vee. Estimating statistical aggregates on probabilistic data streams. In Proceedings of PODS'07, 2007.
12. J. Feigenbaum, S. Kannan, A. McGregor, S. Suri, and J. Zhang. Graph distances in the streaming model: the value of space. In Proceedings of 16th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, pages 745–754, 2005.
13. Surender Baswana. Streaming algorithm for graph spanners - single pass and constant processing time per edge. *Inf. Process. Lett.*, 106(3):110–114, 2008.
14. Alexandr Andoni, Robert Krauthgamer, and Krzysztof Onak. Streaming algorithms via precision sampling. In Proc. 52nd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, pages 363–372, 2011.
15. Richard Matthew McCutchen and Samir Khuller. Streaming algorithms for k-center clustering with outliers and with anonymity. In APPROX-RANDOM, pages 165–178, 2008.
16. A. McGregor. Finding graph matchings in data stream. In Proceedings of the 8th International Workshop on Approximation Algorithms for Combinatorial Optimization Problems, pages 170–181, 2005.

*С.Н. Верзунов, verzunov@hotmail.com*

*Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР, Бишкек,*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ**

В настоящей работе рассмотрены различные архитектуры глубоких нейронных сетей, применяемых для прогноза временных рядов. Выполнено сравнение результатов прогноза дальности видимости в аэропорту Манас, полученных с помощью различных архитектур глубоких нейронных сетей, с результатами, полученными базовым методом прогноза.

**Ключевые слова:** прогноз дальности видимости; глубокое обучение; GRU; LSTM; одномерная сверточная сеть; полиморфная вейвлет-сеть.

### **Введение**

Прогнозирование временных рядов – одна из важнейших прикладных задач машинного обучения и искусственного интеллекта в целом, так как усовершенствование методов прогноза позволит более точно предсказать поведение различных факторов в экономике, технике, геоэкологии и других областях. Основной целью любого прогноза является построение, идентификация, настройка и проверка моделей временных рядов. Традиционно такие модели основываются на методах статистического анализа и математического моделирования, развитых в 60–70-е годы XX века в работах Дж. Бокса, Г. Дженкинса, Ч. Холта, Р. Брауна [1]. Однако в последние десятилетия наряду с традиционными методами широко применяются методы, основанные на технологиях машинного обучения, где на первый план выходят нейросетевые модели. Нейронная сеть хорошо зарекомендовала себя в тех областях, где необходимо применение человеческого интеллекта, в частности, при решении задач классификации, распознавания образов и анализа временных рядов. При помощи нейронных сетей возможно моделирование нелинейной зависимости будущего значения временного ряда от его прошлых значений и от значений внешних факторов [2]. Для прогноза временных рядов различными авторами предлагалось использовать полносвязные нейронные сети прямого распространения [3], мультивейвлетные полиморфные сети [4], машины экстремального обучения [5] и сверточные нейронные сети [6]. Однако важной особенностью всех перечисленных нейронных сетей является отсутствие памяти о временных зависимостях в данных. Каждый пакет входных данных обрабатывается ими независимо, без сохранения состояния между ними, человеческому же интеллекту свойственно воспринимать новую информацию, основываясь на предыдущей информации, и постоянно пополнять свой опыт по мере поступления новой информации. Для учета этой особенности человеческого восприятия хотя бы в упрощенном виде, были предложены различные разновидности рекуррентных нейронных сетей, обрабатывающих элементы временного ряда последовательно, с использованием информации, полученной при обработке предыдущих его элементов. Например, в работе [7] сравниваются нейронные сети прямого распространения и рекуррентные нейронные сети на примере трех широко известных временных рядов: Маккея-Гласса, чисел Вольфа, индекса Standard & Poor's 500 и показано, что для долгосрочного прогнозирования нейронная сеть должна обладать памятью о предыдущих значениях временного ряда, для того чтобы лучше

распознать содержащиеся в нем закономерности. Кроме того, в работе [8] показано преимущество использования полиморфных вейвлет-сетей с обратными связями по сравнению с сетями без обратных связей на примере идентификации моделей нестационарных временных рядов. Недостатком этих рекуррентных нейронных сетей является то, что в каждый момент времени они должны хранить информацию о входных данных за многочисленные предыдущие интервалы времени, но на практике такие протяженные зависимости не поддаются обучению. Это связано с проблемой затухания градиента, напоминающего эффект, наблюдающийся в сетях прямого распространения с большим количеством слоев: по мере увеличения количества слоев сеть в конечном итоге становится необучаемой. Теоретическое обоснование этого эффекта было дано Хохрейтером, Шмидхубером и Бенгио в начале 1990-х гг. [9]. Для решения этой проблемы был предложен слой долгой краткосрочной памяти (Long short-term memory, LSTM) позволяющий повторно задействовать в процессе обучения предыдущую информацию и тем самым решить проблему затухания градиента. Слой управляемых рекуррентных блоков (Gated Recurrent Unit, GRU) основан на том же принципе, что и слой LSTM, однако рекуррентные блоки представляют собой более простые структуры по сравнению с LSTM и, соответственно, менее затратные в вычислительном смысле. В традиционных рекуррентных нейронных сетях для реализации обратной связи используется комбинация скрытого состояния на предыдущем шаге и текущих входных данных в слое с нелинейной функцией активации, например такой, как гиперболический тангенс. В LSTM-сети обратная связь реализуется аналогично, но нейронных слоев используется не один, а четыре. На рис. 1 показана схема работы ячейки LSTM. На горизонтальной линии сверху показано состояние ячейки  $c$ , оно представляет внутреннюю память ячейки. На линии снизу показано скрытое состояние, а вентили  $i$ ,  $f$ ,  $o$  и  $g$  – это механизмы, благодаря которым решается проблема затухания градиента, их значения находятся в процессе обучения сети.

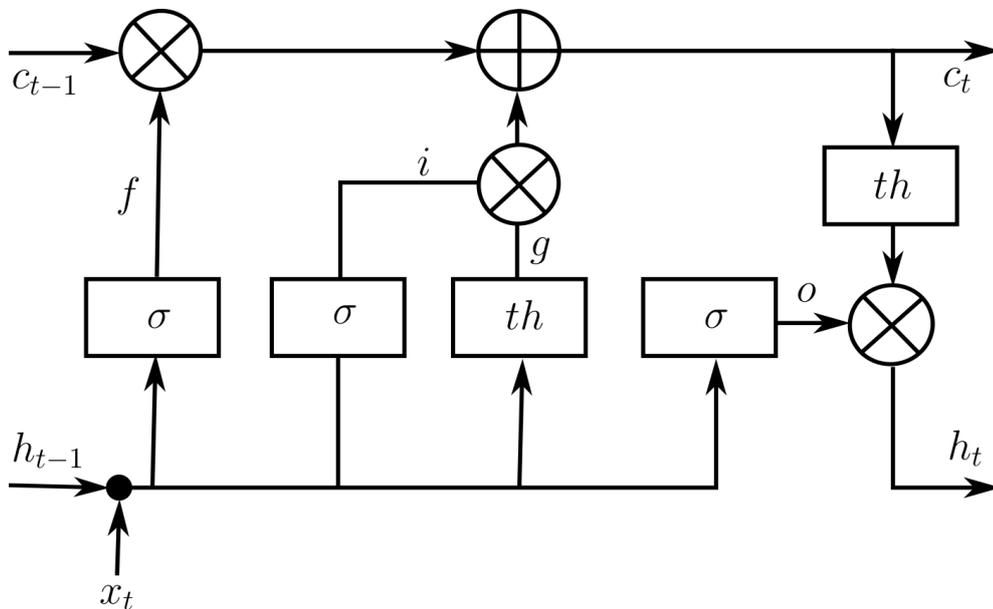


Рисунок 1 – Схема работы ячейки LSTM

Скрытое состояние LSTM-сети  $h_t$  в момент  $t$  по состоянию  $h_{t-1}$  на предыдущем шаге находится по формулам:

$$\begin{aligned}
 i &= \sigma(W_i h_{t-1} + U_i x_t), \\
 f &= \sigma(W_f h_{t-1} + U_f x_t), \\
 o &= \sigma(W_o h_{t-1} + U_o x_t), \\
 g &= th(W_g h_{t-1} + U_g x_t), \\
 c_t &= (c_{t-1} \otimes f) \oplus (g \otimes i), \\
 h_t &= th(c_t) \otimes o.
 \end{aligned}$$

Здесь  $i$ ,  $f$  и  $o$  – входной вентиль, вентиль забывания и выходной вентиль. Все они вычисляются по одним и тем же формулам, но разными матрицами весов  $W_i$ ,  $W_f$ ,  $W_o$  и  $U_i$ ,  $U_f$ ,  $U_o$ . Сигмовидная функция  $\sigma$  модулирует выход вентиля, приводя его к диапазону от 0 до 1, так что порождаемый выходной вектор можно умножить поэлементно на другой вектор, чтобы определить, какая часть второго вектора может пройти через первый. Вентиль забывания определяет, какую часть предыдущего состояния  $h_{t-1}$  желательно пропустить дальше. Входной вентиль определяет, какую часть внутреннего состояния передать следующему слою. Внутреннее скрытое состояние  $g$  вычисляется на основе текущего входа  $x_t$  и предыдущего скрытого состояния  $h_{t-1}$ . Зная  $i$ ,  $f$ ,  $o$  и  $g$ , можно вычислить состояние ячейки  $c_t$  в момент  $t$  как сумму произведений  $c_{t-1}$  на вентиль  $f$  и  $g$  на входной вентиль  $i$ . Наконец, скрытое состояние  $h_t$  в момент  $t$  вычисляется путем умножения памяти  $c_t$  на значение выходного вентиля.

GRU – это вариант LSTM слоя, также обладающий устойчивостью к проблеме затухания градиента, но структура его проще (рис. 2), а потому и обучается он быстрее. Вместо трех вентилях в ячейке LSTM – входного забывания и выходного, в ячейке GRU всего два вентиля: обновления  $z$  и сброса  $r$ . Вентиль обновления определяет, какую часть предыдущего запомненного значения сохранять, а вентиль сброса – как смешивать новый вход с предыдущей памятью. Механизм работы GRU описывается следующими формулами [10]:

$$\begin{aligned}
 z &= \sigma(W_z h_{t-1} + U_z x_t), \\
 r &= \sigma(W_r h_{t-1} + U_r x_t), \\
 c_t &= th(W_c (h_{t-1} \otimes r) + U_c x_t), \\
 h_t &= (z \otimes c) \oplus ((1 - z) \otimes h_{t-1}).
 \end{aligned}$$

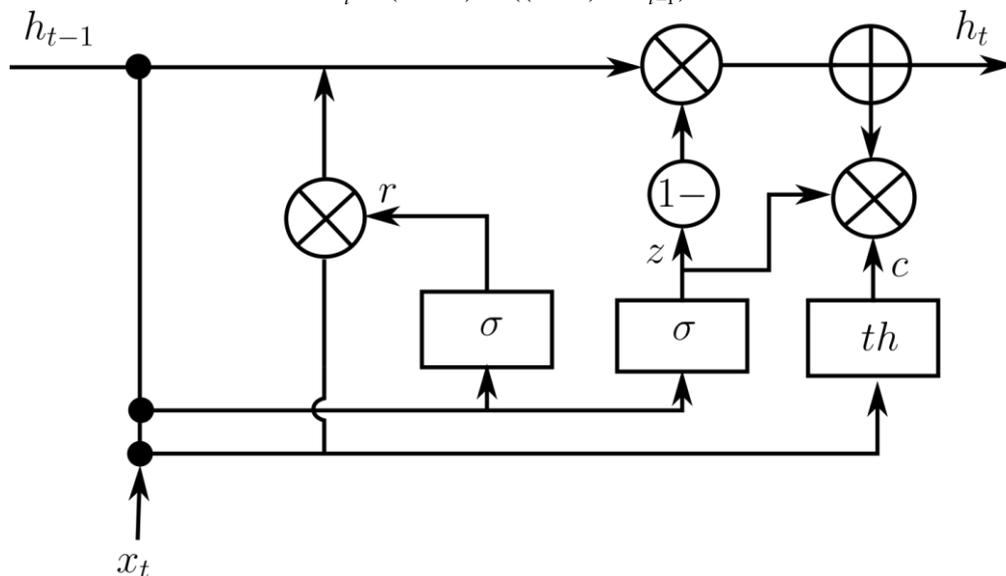


Рисунок 2 – Схема работы ячейки GRU-сети

Кроме рекуррентных нейронных сетей для прогнозирования временных рядов можно использовать сверточные нейронные сети (convolutional neural network, CNN) благодаря их способности к свертыванию параметров, извлечению признаков из локальных входных шаблонов, получению эффективных и модульных представлений данных, несмотря на то, что основная сфера их применения – распознавание образов на изображениях. Время можно рассматривать как пространственное измерение, подобно высоте или ширине двумерного изображения. Такие одномерные сверточные нейронные сети (рис. 3) с успехом могут состязаться с рекуррентными сетями в некоторых задачах обработки последовательностей, как правило, требуя меньше вычислительных ресурсов. Кроме того, известно, что небольшие одномерные сверточные нейронные сети могут служить быстрой альтернативой рекуррентным сетям в таких задачах, как классификация текста и прогнозирование временных рядов [11].

В работе [7] высказана идея использования для прогноза временных рядов гибридной сети, состоящей из полносвязной сети прямого распространения и простой рекуррентной нейронной сети, так как авторами было показано, что рекуррентные нейронные сети дают лучший результат при долгосрочном прогнозировании, а сети прямого распространения – при краткосрочном. Также различными авторами предлагалось для этой цели использовать и другие архитектуры нейронных сетей, как в комбинации с традиционным методом прогноза ARIMA [12], так и по отдельности [13]. Однако появление в последние годы более новых архитектур нейронных сетей, таких как LSTM, GRU, CNN и технологий глубокого обучения, заставляет многих исследователей создавать новые архитектуры глубоких нейронных сетей для прогноза временных рядов [14]. Глубокое обучение – это особый раздел машинного обучения: новый подход к поиску способов обработки информации, делающий упор на обучение последовательных слоев (или уровней) все более значимых преобразований исходных данных. Под глубиной в глубоком обучении не подразумевается более глубокое понимание, достигаемое этим подходом; идея заключается в многослойном представлении. Другими подходящими названиями для этой области машинного обучения могли бы служить: многослойное обучение и иерархическое обучение. Современное глубокое обучение часто вовлекает в процесс десятки и даже сотни последовательных слоев представления – и все они автоматически настраиваются под воздействием обучающих данных. Между тем традиционные подходы к машинному обучению ориентированы на изучении одного-двух слоев представления данных; по этой причине их иногда называют методами поверхностного обучения [11].

Прогноз погодных факторов, являясь, наверное, одной из наиболее старейших задач прогноза, до сих пор привлекает внимание многих ученых ввиду большого влияния климата на различные стороны человеческой жизни. В настоящее время в свободном доступе находятся большие объемы данных, полученные с помощью глобальной сети метеостанций, что позволяет исследовать скрытые в них закономерности с применением методов глубокого обучения для получения более точных прогнозов погодных факторов. Особое значение имеет прогноз погоды в зоне полетной навигации, где одним из важнейших факторов на всех этапах полета является видимость. По данным ИКАО (международной организации гражданской авиации), более 90 % аварий и катастроф происходит в условиях ограниченной видимости, из них 80 % – на посадке. Полеты в горной местности относятся к полетам в особых условиях. Горы оказывают значительное влияние на аэродинамические характеристики воздушных судов, работу средств навигации и метеорологические условия. Основным явлением, затрудняющим или исключаящим выполнение полетов в горной местности, является туман. Возможность выполнения посадки в условиях тумана определяется

эксплуатационными минимумами – высотой принятия решения и вертикальной видимостью на взлетно-посадочной полосе, которые зависят от типа светотехнического оборудования аэродрома [15]. То есть возможность взлета и посадки самолета ограничена не только погодными факторами, но и оборудованием, установленным в аэропорту и на воздушном судне. Однако в условиях очень плохой горизонтальной видимости может оказаться невозможным управлять самолетом на взлетно-посадочной полосе и рулежных дорожках, ведущих к стоянке самолетов [16].

Среднее в году число дней с туманами в центральной по высоте зоне Бишкека равно 29, а максимально возможное – 45. Эти показатели можно распространить и на всю северную зону города, так как метеостанция Чуйская, расположенная примерно на 150 м ниже, имеет такие же данные наблюдений. Следовательно, туманы в зоне аэропорта Манас являются достаточно обыденным явлением в холодную половину года, поздней осенью, зимой и ранней весной они представляют вполне ощутимые сложности для авиации, связанные с возможной отменой и переносом рейсов, а также для работы наземного транспорта [17], что приводит к большим финансовым и временным потерям. В настоящее время вопрос прогноза дальности видимости исследуется многими учеными. Так в работе [16] исследуется возможность прогноза видимости в аэропорту Ханг Надим в Индонезии с помощью модели ARIMA и нейронной сети LSTM и показано, что для данной задачи сеть LSTM значительно превосходит ARIMA по точности прогноза. Так же в работе [18] показана возможность прогнозирования видимости в аэропорту Урумчи с помощью многослойной нейронной сети.

Таким образом, прогноз видимости в аэропорту Манас в связи с его географическим расположением, особенностями климата и большим влиянием на движение воздушных судов и наземного транспорта является актуальной задачей и в настоящей работе исследуются различные архитектуры глубоких нейронных сетей для прогнозирования временного ряда горизонтальной дальности видимости.

**Постановка задачи**

Итак, рассматривается многомерный временной ряд данных о погоде  $\mathbf{x}_t$  размерностью  $S$ . Известны  $K$  значений этого временного ряда, взятые через равные промежутки времени:  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \dots, \mathbf{x}_N$ , и необходимо прогнозировать значения одного из элементов этого ряда в будущий момент времени с упреждением прогноза  $f$ :  $x_{1,N+f}$ , используя для этого  $p$  его предыдущих отсчетов. Для получения прогноза необходимо построить матрицы входных данных:

$$\mathbf{x}_n = \begin{pmatrix} x_{1,n} & x_{1,n+1} & \dots & x_{1,n+p-1} \\ x_{2,n} & x_{2,n+1} & \dots & x_{2,n+p-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{S,n} & x_{S,n+1} & \dots & x_{S,n+p-1} \end{pmatrix}^T, n = 1, 2, \dots, K - p,$$

последовательность которых задает тензор обучающих данных:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 & \mathbf{x}_2 & \dots & \mathbf{x}_{N-p-f} \\ \mathbf{x}_2 & \mathbf{x}_3 & \dots & \mathbf{x}_{N-p-f+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{x}_p & \mathbf{x}_{p+1} & \dots & \mathbf{x}_{N-f} \end{pmatrix},$$

и целевой вектор

$$\mathbf{y} = (x_{1,p+f}, x_{1,p+f+1}, \dots, x_{1,N}).$$

Тензор обучающих данных и целевой вектор необходимо использовать для настройки параметров глубокой нейронной сети. Если на вход обученной нейронной сети подать матрицу

$$\begin{pmatrix} x_{1,N-p-f+1} & x_{1,N-p-f+2} & \dots & x_{1,N} \\ x_{2,N-p-f+1} & x_{2,N-p-f+2} & \dots & x_{2,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{S,N-p-f+1} & x_{S,N-p-f+2} & \dots & x_{S,N} \end{pmatrix}^T$$

на выходе должен получиться искомым прогноз  $x_{N+f}^1$ , аналогично можно получить прогнозы  $x_{N+f+1}^1, x_{N+f+2}^1$  и так далее.

**Методы и исходные данные**

Исходные данные для исследования были получены с сайта gr5.ru [19]. Данные наблюдений в формате SYNOP поступают на сайт восемь раз в сутки, через каждые три часа. В настоящее время сайт предоставляет прогнозы погоды для 172500 населённых пунктов и данные наблюдений, выполненных на 10400 метеостанциях. Из всего набора доступных данных для проведения эксперимента были выбраны временные ряды горизонтальной видимости, температуры, давления, направления ветра, скорости ветра и влажности за 14 лет – с апреля 2005 г. по апрель 2019 г. В целом рассматривались данные 5 станций, расположенных примерно на одинаковой высоте над уровнем моря (максимальная разность высот составила немногим более 200 м) в радиусе 150 км от аэропорта Манас (табл. 1). Обучающая выборка составила 30000 отсчетов, тестовая – 10000, оставшиеся данные (рис. 3) использовались для построения контрольных прогнозов. Отсутствующие по тем или иным причинам значения были заполнены предыдущими существующими значениями. Затем данные, содержащие качественные оценки и представленные в текстовом виде, такие как направление ветра, например, «Ветер, дующий с востока», были векторизованы путем их кодирования целыми числами в порядке их появления в исходных данных.

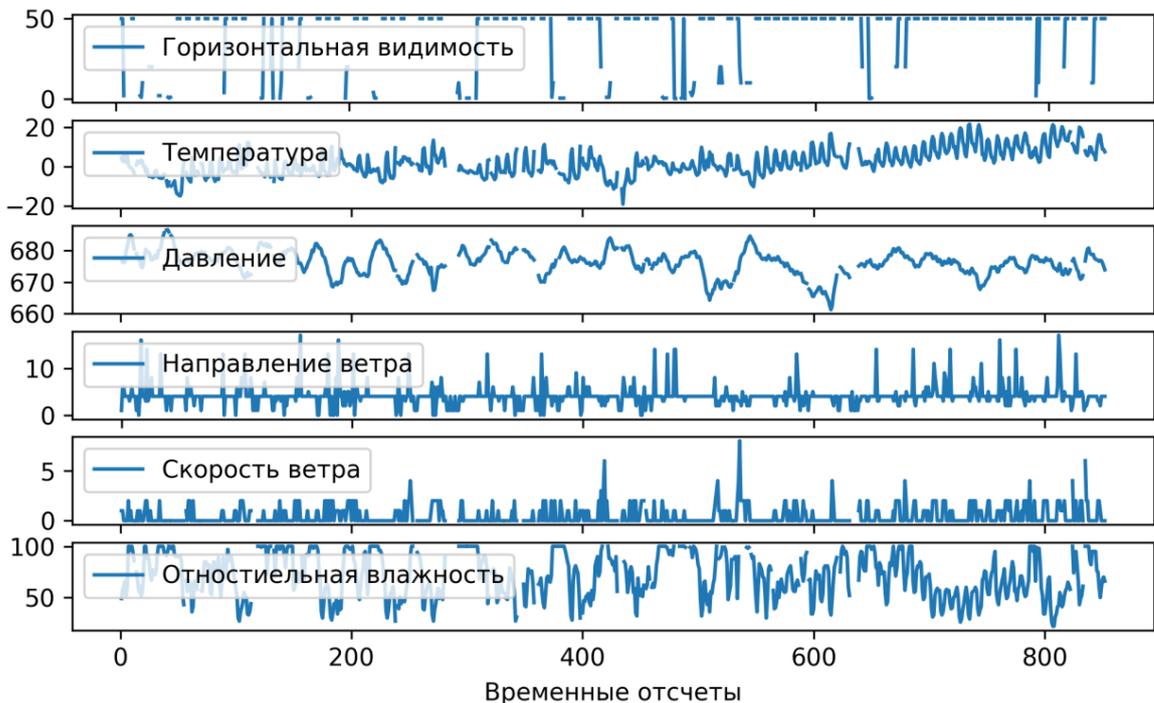


Рисунок 3 – Данные о погоде в аэропорту Манас в период с 15 декабря 2018 по 1 апреля 2019 г.

Далее векторизованные данные нормировались с помощью  $z$ -оценок:

$$s' = \frac{s - \mu}{\sigma},$$

где  $s$  – исходное значение признака;  $s'$  – нормированное значение;  $\mu$  – среднее значение признака;  $\sigma$  – стандартное отклонение. Величины  $\mu$  и  $\sigma$  вычислялись по обучающей выборке. Рассматривалась возможность прогноза на 1 шаг вперед, с дальностью 3, 12, 24 часа. При этом использовались данные 1, 3 и 5 станций из табл. 1 в порядке их удаления от аэропорта Манас.

Так как дальность видимости может принимать 21 дискретное значение, эти значения были закодированы целыми числами, а ошибка сети вычислялась по формуле категориальной перекрестной энтропии [21]:

$$CE = -\frac{1}{B} \sum_{i=1}^B \sum_{c=1}^C 1(y_i \neq C_c) \ln p(y_i \in C_c), \quad (1)$$

где  $B$  – количество выборок исходных данных на каждом шаге обучения – параметр, от которого зависит скорость и точность обучения, его значение принято равным 128, так как при этом значении получается меньшая ошибка прогноза на тестовой выборке;  $C$  – количество возможных дискретных значений;  $1(y_i \in C_c)$  – функция возвращающая 1, если  $i$ -тое наблюдение равно дискретному значению  $C_c$ , а иначе 0,  $p(y_i \in C_c)$  – вероятность, предсказанная моделью того, что  $i$ -тое наблюдение принимает дискретное значение  $C_c$ .

Архитектура используемых LSTM и GRU сетей показана на рис. 4, они состоят из LSTM и полносвязного слоя (Dense) с функцией активации *softmax*, необходимого для

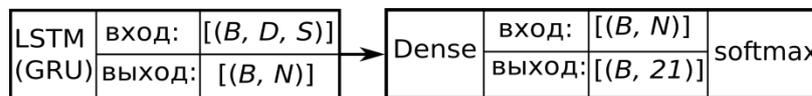


Рисунок 4 – Архитектура используемых нейронных сетей GRU и LSTM

получения итогового прогноза,  $D$  – количество предыдущих отсчетов временного ряда, необходимых для прогноза, это значение в 6 раз превышает дальность прогноза, а  $N$  – количество LSTM или GRU ячеек в сети. При большом значении этого параметра

Таблица 1 – Станции – источники данных

Станция	Страна	Широта, град.	Долгота, град.	Высота над .ур.м., м.	Удаление, км
Манас	Кыргызстан	43.067	74.483	637.0	0
Бишкек	Кыргызстан	42.850	74.533	760.0	24
Токмак	Кыргызстан	42.833	75.283	817.0	70
Отар	Казахстан	43.533	75.250	743.0	81
Хантау	Казахстан	44.217	73.800	504.0	139

после нескольких эпох обучения возникает эффект переобучения, т.е. ошибка на тестовой выборке становится намного больше, чем на обучающей. При малом значении сеть не обладает достаточной репрезентативной емкостью, в результате значение ошибки остается очень большим даже после множества эпох обучения. После перебора нескольких возможных вариантов  $N$  принято равным 32. Наконец,  $S$  – количество признаков в одной выборке, равное произведению количества станций, используемых

для прогноза на 6, т.е. на количество признаков, имеющихся для каждой станции (горизонтальная видимость, температура, давление, направление ветра, скорость ветра и влажность).

На рис. 5 показана архитектура используемых гибридных нейронных сетей. Основная идея, положенная в их основу, описана в работе [9] и заключается в том, чтобы объединить скорость и легкость сетей прямого распространения с временной памятью рекуррентных нейронных сетей.

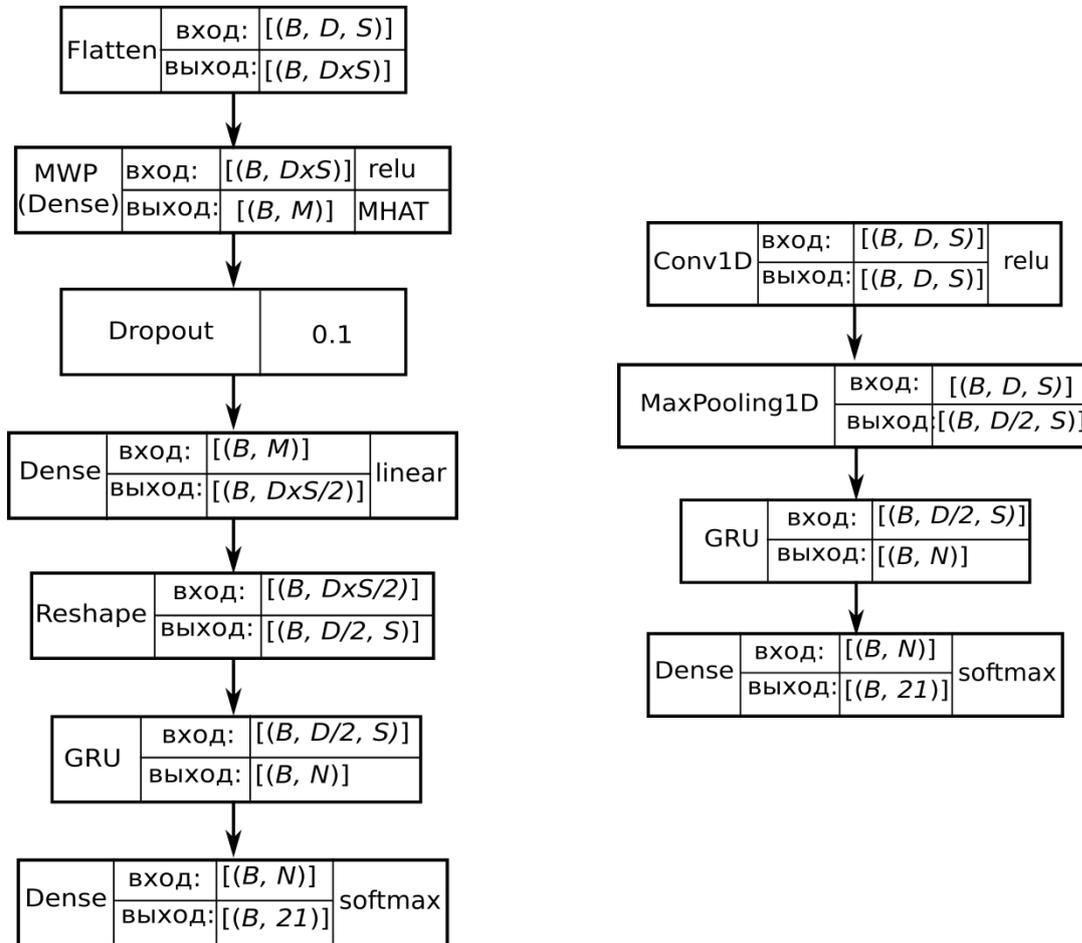


Рисунок 5 – Архитектуры используемых гибридных нейронных сетей

Сеть прямого распространения (полносвязная, вейвлет-сеть или сверточная) превращает длинную входную последовательность в более короткую последовательность высокоуровневых признаков, а затем последовательность выделенных признаков подается на вход рекуррентной части гибридной нейронной сети (рис. 6). Этот прием оказывается особенно выгодным, когда имеющиеся последовательности настолько длинны, что их затруднительно обработать с помощью рекуррентной сети.

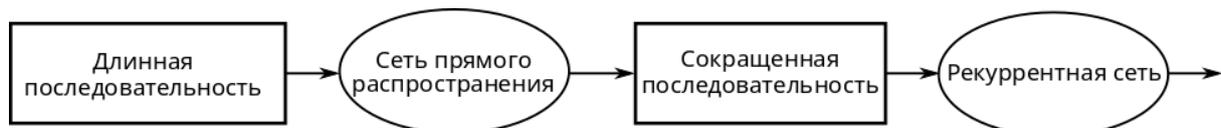


Рисунок 6 – Объединение сети прямого распространения и рекуррентной сети для обработки длинных последовательностей

Слой Flatten, показанный на рис. 5, преобразует входной тензор с формой  $[B, D, S]$  в матрицу с формой  $[B, D \times S]$ , каждая строка которой затем поступает на вход сверточного полносвязного или мультвейвлетного полиморфного слоя (MultiWavelet Polymorphic, MWP), схема работы которого показана на рис. 7. Для прогнозирования дальности видимости использовался слой, выходы которого определяются как:

$$\Psi_j(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \psi(z_{ij}),$$

где  $\Psi_j(\mathbf{x})$  –  $j$ -тый выход сети, многомерный вейвлет, задающийся как сумма  $m$  скалярных вейвлетов [20];  $\mathbf{x}$  – вектор входных данных;  $m$  – количество входов;  $\psi$  – материнский вейвлет, и

$$z_{ij} = \frac{x_i - w_{(\xi)ij}}{w_{(\zeta)ij}}.$$

$$\Psi_j(x) = \sum_{i=1}^m \psi(z_{ij}, w_{(\rho)ij})$$

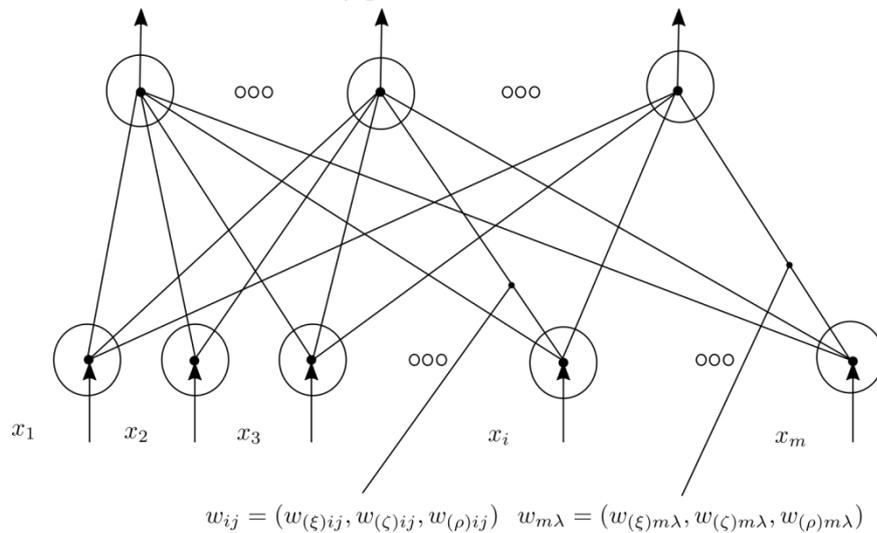


Рисунок 7 – Схема работы мультвейвлетного полиморфного слоя

В этом выражении  $i=1, \dots, m, j=1, \dots, \lambda$ , где  $\lambda$  – число вейвлет-нейронов слоя, равное количеству выходов,  $w_{(\xi)ij}$  – параметры сдвигов и  $w_{(\zeta)ij}$  – параметры масштабов вейвлетов. В качестве материнского вейвлета можно использовать полиморфный вейвлет МНАТ:

$$\psi(z_{ij}, w_{(\rho)ij}) = (w_{(\rho)ij} - z_{ij}^2) e^{-\frac{z_{ij}^2}{2}},$$

где  $w_{(\rho)ij}$  – дополнительный настраиваемый параметр формы вейвлета (рис. 8).

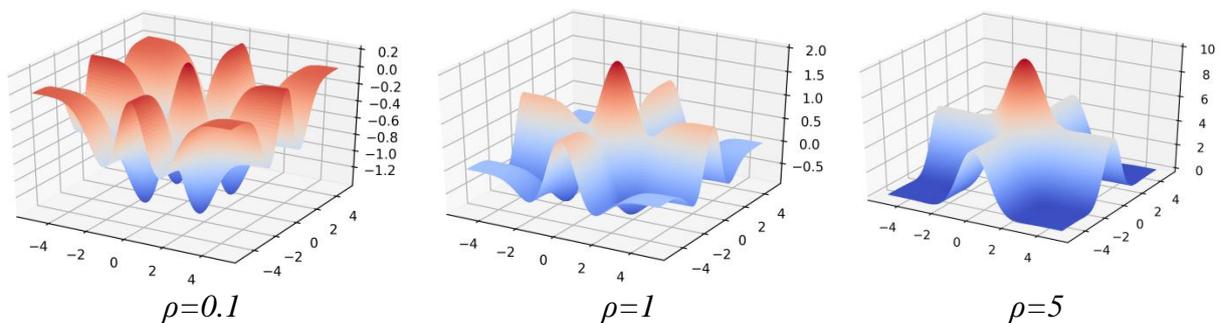


Рисунок 8 – Полиморфный МНАТ-вейвлет

Кроме полносвязной и вейвлет-сети для сокращения длины входной последовательности используется также одномерная сверточная сеть. Схема работы одномерного сверточного слоя (Conv1D) показана на рис. 9. Сети, содержащие такой слой,

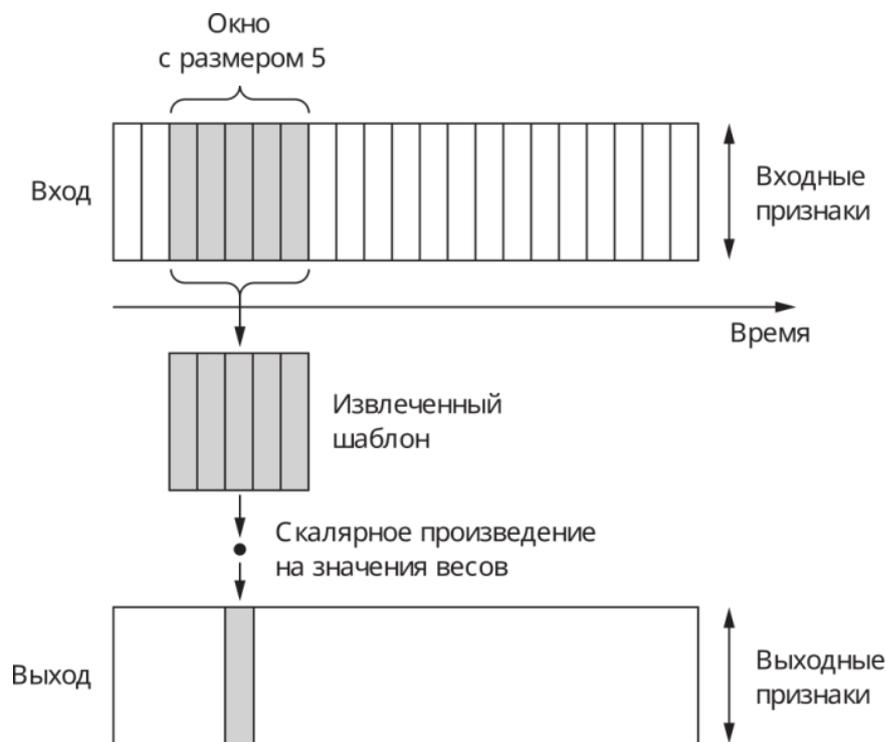


Рисунок 8 – Схема работы одномерного сверточного слоя

способны распознавать локальные шаблоны во временном ряду. Поскольку к каждому шаблону применяются одни и те же преобразования, тот или иной шаблон, найденный в некоторой части временного ряда, может быть опознан и в другом месте, что делает преобразования, выполняемые одномерными сверточными сетями, инвариантными во времени. Слой MaxPooling1D используется для снижения разрешения входной последовательности, возвращая максимальное значение из соседних входных значений. Архитектура всех описанных выше полносвязных, вейвлет- и сверточных нейронных слоев выбрана таким образом, чтобы сократить входную последовательность в 2 раза.

Для борьбы с переобучением применяется прореживание (Dropout), заключающееся в удалении (обнулении) 10 % случайно выбираемых выходов предыдущего слоя. На этапе тестирования прореживание не производится; вместо этого выходные значения слоя делятся на коэффициент, зависящий от коэффициента прореживания, чтобы компенсировать разницу на этапах тестирования и обучения [11]. Для регуляризации выходов, сформированных рекуррентными слоями, такими как GRU и LSTM, к внутренним рекуррентным слоям блоков применяется постоянная во времени маска прореживания с коэффициентом 0.2. Как было показано в работе [21] применение одной той же маски прореживания к каждому интервалу времени позволяет сети правильно распространить свою ошибку обучения во времени и добиться тем самым более точного прогноза.

Для сравнения предлагается использовать также базовый метод прогноза, заключающийся в том, что через 3 часа дальность видимости будет такой же, как и сейчас, а через 12 и 24 часа будет равна 50 км – самому часто встречающемуся возможному значению.

**Результаты и обсуждение**

В табл. 2 показан процент верно выполненных прогнозов сетями с различными архитектурами, обученными по алгоритму RMSProp [22] на протяжении 50 эпох по 500 шагов, в каждом из которых ошибка вычислялась по формуле (1).

Таблица 2 – Результаты вычислительного эксперимента

Упреждение прогноза	3 часа			12 часов			24 часа		
	Количество станций								
	1	3	5	1	3	5	1	3	5
LSTM	93.36	92.73	89.48	89.87	89.78	89.59	89.57	89.57	89.57
GRU	93.41	92.91	89.48	89.97	89.64	89.59	89.57	89.57	89.57
Dense+GRU	93.39	92.37	89.48	89.59	89.59	89.59	89.57	89.57	89.57
Conv1D+GRU	92.19	91.60	89.48	89.59	89.59	89.59	89.57	89.57	89.57
MWP+GRU	93.21	92.62	89.48	89.59	89.59	89.59	89.57	89.57	89.57
Базовый метод	93.59			89.59			89.57		

Из табл. 2 видно, что для прогноза с упреждением 3 часа процент верно выполненных с помощью глубоких сетей прогнозов немного ниже, чем у прогноза, полученного с помощью базового метода, а для упреждения 24 часа равен ему. Другими словами, обученные нейронные сети практически точно воспроизводят предложенный базовый метод прогноза. Значение верности 89.48 %, полученное при обучении сетей по данным 5 метеостанций соответствует предположению, что дальность видимости будет всегда принимать значение 50 км.

Как показывают результаты вычислительного эксперимента, использование данных нескольких метеостанций не является целесообразным, так как при этом точность прогноза только ухудшается. На рис. 9 показано изменение SE в процессе обучения сетей. Как можно видеть из графиков, уже при упреждении прогноза в 12 часов начинает проявляться эффект переобучения, так как с увеличением упреждения

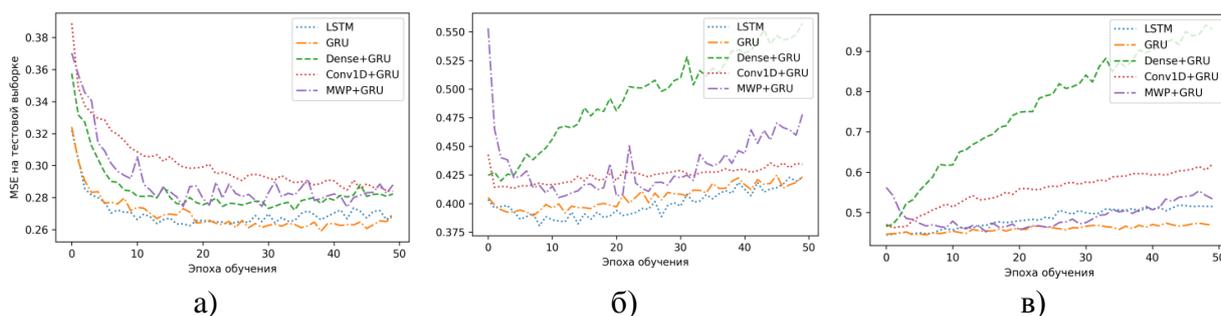


Рисунок. 9 – Зависимость MSE глубоких нейронных сетей от эпохи обучения на тестовой выборке для прогноза по данным одной станции с дальностью: а) 3 часа, б) 12 часов, в) 24 часа

прогноза увеличивается количество предыдущих отсчетов, необходимых для его получения, а следовательно, уменьшается количество образцов в обучающей выборке. Это говорит о том, что использование сетей с одинаковой архитектурой при разной дальности прогноза не является оптимальным вариантом. При увеличении дальности прогноза емкость сетей, т.е. количество нейронов в скрытых слоях, необходимо уменьшать или же увеличивать объем обучающей выборки для того, чтобы избежать переобучения.

На рис. 10 показаны результаты прогнозов с упреждением 12 часов, полученных с применением нейронных сетей GRU и LSTM, обученных до достижения минимального значения СЕ. Как можно видеть из рис. 10, при упреждении прогноза 12 часов нейронные сети хотя и не комбинируют два варианта, предложенных в базовом методе, но в целом не дают прогноз, значительно превосходящий по точности базовый метод. Это, скорее всего, можно объяснить тем, что временной интервал между возникновением совокупности погодных условий, являющихся причиной ухудшения или улучшения дальности видимости, и возникновением этого явления составляет менее 3 часов. Следовательно, для прогноза дальности видимости необходимо использовать данные о погоде с меньшим шагом по времени, чем были использованы в данной работе.

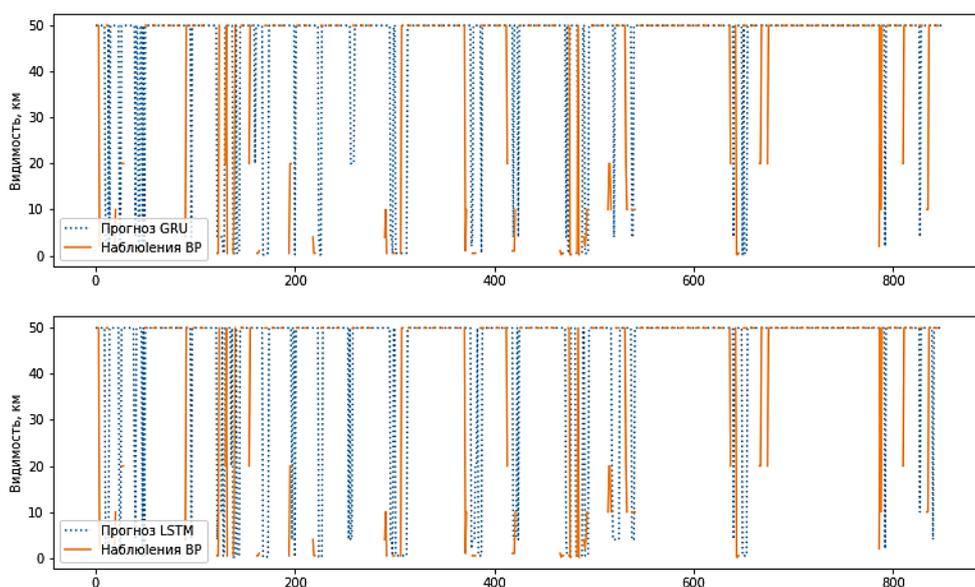


Рисунок 10 – Прогноз дальности видимости с упреждением 12 часов с помощью GRU и LSTM нейронных сетей в период с декабря 2018 по апрель 2019 г.

### Заключение

Таким образом, в настоящей работе рассмотрены различные архитектуры глубоких нейронных сетей, применяемых для прогноза временных рядов. Показано, что прогноз дальности видимости в аэропорту является актуальной задачей и предложен базовый метод прогноза такого временного ряда. Выполнено сравнение результатов прогноза, полученных с помощью различных архитектур глубоких нейронных сетей, и результатов, полученных базовым методом прогноза. Показано, что использование данных нескольких метеостанций не является целесообразным для прогноза дальности видимости. Также показано, что использование одинаковых методов прогноза и идентичных архитектур нейронных сетей для различных значений упреждения прогноза с использованием одинаковых данных не является оптимальной стратегией прогноза. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что для прогноза дальности видимости необходимы данные погоды с временным шагом менее 3 часов.

### Литература

1. Подкорытова, О. А. Анализ временных рядов: учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры / О. А. Подкорытова, М. В. Соколов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2018.

2. Григорьева Д.Р. Методы статистического прогнозирования // *Экономический анализ: теория и практика*. – 2015 . – №17. – С. 21.
3. Великанова Л.И. Краткосрочное прогнозирование влажности горных грунтов // *Проблемы автоматизации и управления*. – 2015, №4.– С. 158–166.
4. Верзунов С.Н., Лыченко Н.М. Мультивейвлетная полиморфная сеть для прогнозирования геофизических временных рядов // *Проблемы автоматизации и управления*. – 2017. – № 1 (32). – С. 78–87.
5. Lei Yu, Zhao Danning, Cai Hongbing Prediction of length-of-day using extreme learning machine//*Geodesy and geodynamics*. – 2015 V. 6. N. 2. – P. 151–159.
6. Koprinska, Irena et al. Convolutional Neural Networks for Energy Time Series Forecasting // *2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. 2018: p 1–8.
7. Miljanovic M. Comparative analysis of Recurrent and Finite Impulse Response Neural Networks in Time Series Prediction // *Indian Journal of Computer Science and Engineering (IJCSSE)*. –2012 V. 3 N. 1 – P. 180–191
8. Верзунов С.Н., Лыченко Н.М. Полиморфная вейвлет-сеть с обратными связями для идентификации нестационарных временных рядов // *Проблемы автоматизации и управления*. – 2017. – № 2 (33). – С. 52–61.
9. Bengio Y., Simard P., Frasconi P. Learning Long-Term Dependencies with Gradient Descent Is Difficult // *IEEE Transactions on Neural Networks*. – 1994 V. 5.– N. 2.
10. Антонио Джулли, Суджит Пал. Библиотека Keras – инструмент глубокого обучения. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 294 с.
11. Шолле Ф. Глубокое обучение на Python. – СПб.: Питер, 2018.
12. Cagdas Hakan Aladag and Erol Egrioglu, Cem Kadilar Forecasting nonlinear time series with a hybrid methodology // *Applied Mathematics Letters* 22 (2009). 1467–1470.
13. R. Khaldi, A.E. Afia, and R. Chiheb. SIG Proceedings Paper in word Format. In *Proceedings of ACM LOPAL conference, Rabat, Morocco, May 2018 (LOPAL'18)*, 6 p.
14. Shengdong Du, Tianrui Li, Yan Yang, Shi-Jinn Horng: Deep Air Quality Forecasting Using Hybrid Deep Learning Framework. *CoRR abs/1812.04783* (2018).
15. Жильчук И.А. Диагноз и прогноз посадочных характеристик видимости с глиссады снижения в туманах горной местности: автореф. дис... канд. геогр. наук. – Воронеж, 2006. – 24 с.
16. Salman, Afan Galih; Heryadi, Yaya; Abdurahman, Edi; Suparta, Wayan / Weather forecasting using merged Long Short-Term Memory Model (LSTM) and Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) Model. In: *Journal of Computer Science*. 2018.– Vol. 14, No. 7.– Pp. 930–938.
17. Подрезов О. А. Современный климат Бишкека, Чуйской долины и северного склона Киргизского хребта. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2013. – 202 с.
18. Zhu, L., Zhu, G.D., Han, L. and Wang, N. (2017) The Application of Deep Learning in Airport Visibility Forecast. *Atmospheric and Climate Sciences*, 7, 314–322 11th International Conference on Agents and Artificial Intelligence. 2019. Vol. 2, Pp. 466–473.
19. <https://rp5.ru/docs/search/en> (дата обращения: 01.04.2019).
20. Said, S., Jemai, O., Hassairi, S., Ejbali, R., Zaiied, M., Amar, C.B.: Deep wavelet network for image classification // *SMC*. 2016. –Pp. 922–927.
21. <http://mlg.eng.cam.ac.uk/yarin/thesis/thesis.pdf> (дата обращения: 20.03.2019).
22. [http://www.cs.toronto.edu/~tijmen/csc321/slides/lecture\\_slides lec6.pdf](http://www.cs.toronto.edu/~tijmen/csc321/slides/lecture_slides lec6.pdf) (дата обращения: 22.03.2019).

*В.В. Гайдамако, [dolpha@gmail.com](mailto:dolpha@gmail.com)*

*Д.О. Авельцов, [dmitry.aveltsov@gmail.com](mailto:dmitry.aveltsov@gmail.com)*

*Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР, г. Бишкек*

## **К ВОПРОСУ О МЕТОДАХ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ СИСТЕМ**

В статье приведен обзор базовых принципов поэтапного горизонтального масштабирования высоконагруженных систем. Рассмотрены вопросы выделения сервера баз данных, создания сервера кэширования и сервера очередей, размещения файловых хранилищ на отдельных физических серверах, разделения веб серверов на фронтенд и бекенд серверы. Также рассмотрены вопросы балансировки нагрузки с использованием фронтенд сервера и DNS сервера.

Ключевые слова: highload; высоконагруженные системы; балансировка нагрузок; масштабирование; горизонтальное масштабирование.

Введение. В настоящее время информационные технологии стали неотъемлемой частью в функционировании современного общества и инфраструктуры. С появлением децентрализованной сети Интернет и ростом числа пользователей появилась потребность в передаче большого количества данных и в системах передачи, которые способны обслуживать большое количество запросов. Большое число запросов обслуживают высоконагруженные (высоконагрузочные) системы, highload – термин более известен в России, Германии, Пакистане, high-volume – термин распространен в США., Канаде, Австралии и в большей части Европейских стран.

В роли клиентов для таких систем могут выступать как пользователи, так и устройства. К примеру, интернет вещей (IoT), который создает обширную сеть устройств, регулярно обменивающихся данными. По статистике ожидается, что к 2025 году во всем мире будет более 64 миллиардов устройств IoT. Согласно последним исследованиям, число устройств IoT в мире достигло 10 миллиардов в 2018 году [1]. Оценки, конечно, различаются, поскольку в другом исследовании число для 2018 года составляет 7 миллиардов устройств, а в 2025 году – 22 миллиарда [2]. Специалисты компании Gartner, которая является ведущей в мире исследовательской и консультационной компанией, предсказывают, что к 2021 году к сети будут подключены 25 миллиардов IoT-устройств [3], по данным компании Intel к 2020 году ожидается 200 миллиардов устройств [4]. Такое количество устройств ожидается будет генерироваться большое количество данных, к которым потребуется обеспечить бесперебойный доступ большого числа пользователей из любой точки мира.

Высоконагруженные системы связаны не только с миром интернета вещей, все больше компаний уходят в цифровое пространство, стараясь автоматизировать свои рабочие процессы. Это позволяет минимизировать затраты и ресурсы и повысить эффективность работы. Ежегодно появляются новые платформы, приложения, привлекая все больше пользователей. Ежедневно миллиарды людей взаимодействуют с огромным объемом информации и обмениваются данными, что создает большую нагрузку на сети и системы. Вопросы обеспечения работоспособности в условиях высокой нагрузки особенно актуальны для облачных систем, в которых доступные ресурсы должны своевременно и эффективно распределяться между работающими приложениями для обеспечения требуемой производительности. Ниже приведен обзор

основных принципов поэтапного горизонтального масштабирования высоконагруженных систем.

### Что такое highload

В информационном пространстве существует множество определений термина «хайлоад». Хайлоад можно определить как состояние системы, грозящее отказом в обслуживании из-за недостатка ресурсов. Высоконагруженная система должна отвечать следующим требованиям: производительность, масштабируемость и высокая доступность. Дефакто стандартом определения производительности является время реакции системы меньше одной секунды.

### Основные причины, по которым возникает угроза отказа в обслуживании

Ошибки при проектировании архитектуры системы, ошибки при реализации, ошибки сопровождения, недостаток ресурсов: оперативная память, процессорное время, место для хранения данных, ширина канала сети, питание, количество работников, финансирование.

### Принципы построения архитектуры высоконагруженных приложений

Очень важным свойством системы является слабая связанность компонентов и масштабируемость.

**Масштабируемость** (scalability) в электронике и информатике означает способность системы, сети или процесса справляться с увеличением рабочей нагрузки (увеличивать свою производительность) при добавлении ресурсов (обычно аппаратных).

Существуют два способа масштабирования – вертикальное и горизонтальное.

**Вертикальное масштабирование** – увеличение производительности каждого компонента системы с целью повышения общей производительности. Масштабируемость в этом контексте означает возможность заменять по мере роста требований и развития технологий в существующей вычислительной системе компоненты более мощными и быстрыми. Это самый простой способ масштабирования, так как не требует никаких изменений в прикладных программах, работающих на таких системах.

**Горизонтальное масштабирование** – разбиение системы на более мелкие структурные компоненты и разнесение их по отдельным физическим машинам (или их группам), и (или) увеличение количества серверов, параллельно выполняющих одну и ту же функцию. Масштабируемость в этом контексте означает возможность добавлять к системе новые узлы, серверы, процессоры для увеличения общей производительности. Этот простой способ масштабирования может требовать внесения изменений в программы, чтобы они могли в полной мере пользоваться возросшим количеством ресурсов [5].

При вертикальном масштабировании есть ограничения в виде предельной мощности и скорости работы заменяемых компонентов. Рано или поздно систему придется масштабировать горизонтально. Если в архитектуру системы не заложить возможность для масштабируемости, то впоследствии придется менять архитектуру системы.

### Сервер баз данных

Чаще всего первым узлом, который оказывается под нагрузкой, является база данных. Перенос базы данных на отдельный физический сервер (рис. 1) увеличит ее

производительность и освободит ресурсы для других компонентов системы. В данной работе не рассматривается масштабирование баз данных. Масштабирование баз данных – одна из самых сложных задач. Существует достаточно много практик: денормализация, шардинг, репликации и другие. Заметим, что иногда повысить производительность сервера баз данных можно просто продуманной индексацией.



Рисунок 1 – Пример с переносом сервера баз данных на отдельный сервер

Существует множество способов переноса сервера базы данных на другой сервер. Рассмотрим два самых распространенных способа. В качестве примера рассмотрим СУБД PostgreSQL и операционную систему Ubuntu 18.04.

Первый способ с остановкой программной системы, – создать резервную копию данных с помощью команды `pg_dump`:

```
pg_dump -h localhost -F t -c -U postgres database_name | gzip -c > database_dump.gz
```

Вывод данной команды направлен через `gzip` для упаковки в архив.

Здесь `database_name` – имя базы данных, `database_dump.gz` – имя файла с резервной копией данных, `-h localhost` – указание имени хоста, `-F(t|c|p)` – формат вывода данных `custom`, `tar`, `plane text`. Ключом `-U` указывается имя пользователя, `-c` добавляет команды для удаления таких объектов, как таблицы, виды и др.

Далее требуется установить СУБД на новый сервер и перенести резервную копию данных.

Чтобы загрузить резервную копию базы данных из архива в СУБД, требуется исполнить команду.

```
zcat database_dump.gz | psql database_name
```

Второй способ – без остановки системы. Для этого следует воспользоваться `master-slave` репликацией в синхронном режиме. Синхронный режим гарантирует копирование данных с мастер сервера на подчиненный. После реплицирования данных требуется поменять настройки системы для обращения к новому серверу баз данных.

### Перенос веб сервера

подавляющее большинство веб приложений использует готовые решения в виде веб серверов (`nginx`, `apache` и т.д.). Перенос веб сервера на отдельный узел (рис. 2) позволит оставить больше ресурсов для приложения (`php`, `golang`, `python` и т.д.). Часто встречается архитектура с разделением веб серверов на фронтенд (`front-end`) сервер и

бекенд (back-end) сервер (рис. 3). Фронтенд сервер (часто nginx) принимает запросы от пользователей и передает их на бекенд сервер, который, в свою очередь, взаимодействует с языковым модулем. Такое разделение позволяет избежать проблемы “медленно читающего клиента”. Во многих регионах скорость сети Интернет (часто это мобильные сети) невысока, соединение сервера заблокировано на прием новых запросов в то время, когда клиент получает ответ от сервера, так что, если использовать только бекенд веб сервер в качестве основного, не исключена возможность достижения лимита максимального количества соединений с веб сервером. Фронтенд сервер берет на себя роль отдачи информации клиенту, nginx по умолчанию имеет пул 10000 соединений и спроектирован с оптимизацией на скорость отдачи данных. Фронтенд веб сервер также используется в качестве балансировщика нагрузки для распределения нагрузки между несколькими узлами (рис. 4). Балансировку нагрузки также можно настроить на уровне TCP (haproxy).

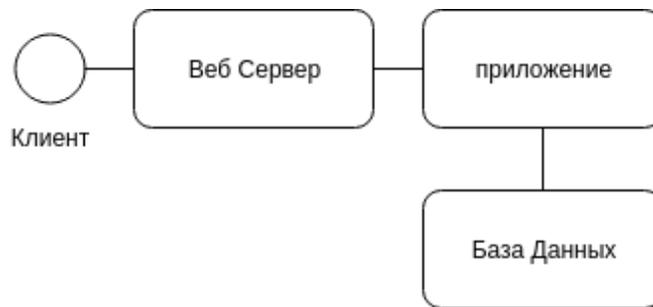


Рисунок 2 – Перенос веб сервера на отдельный сервер

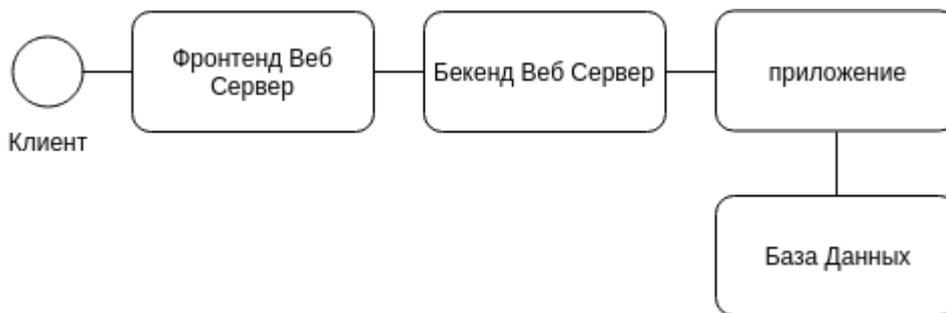


Рисунок 3 – Разделение на фронтенд и бекенд серверы

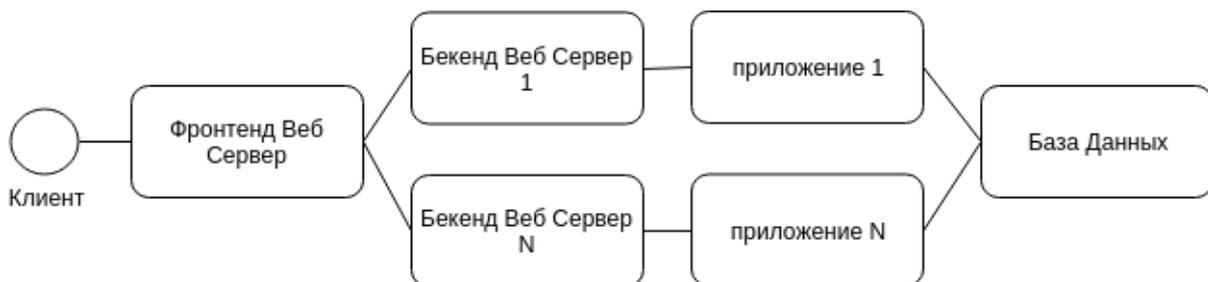


Рисунок 4 – Фронтенд сервер в виде балансировщика нагрузки

В качестве примера рассмотрим настройки Nginx как балансировщика нагрузки.

За балансировку нагрузки в nginx отвечает модуль ngx\_http\_upstream\_module. В файле конфигурации требуется найти секцию настроек http и добавить туда следующие настройки модуля ngx\_http\_upstream\_module:

```
upstream backend {
server backend-1.example.com;
server backend-2.example.com;
server backend-N.example.com;
}
```

Перенаправление группы backend

```
server {
location / {
proxy_pass http://backend;
}
}
```

Можно настроить веса для каждого адреса сервера. Например, если первый сервер имеет большую мощность, чем остальные, то ему можно перенаправлять большее количество запросов.

```
upstream backend {
server backend-1.example.com weight=2;
server backend-2.example.com;
server backend-3.example.com;
}
```

По умолчанию вес равен 1, и запросы распределяются в режиме Round-robin. В приведенном примере при получении 4 запросов первые два запроса будут перенаправлены на server backend-1.example.com, третий и четвертый – на server backend-2.example.com и server backend-3.example.com соответственно.

Кроме метода распределения нагрузки Round-Robin существуют такие методы, как least\_conn, random и least\_time. В режиме least\_conn запросы перенаправляются на сервер с наименьшим количеством подключений (с учетом весов). В режиме least\_time запросы перенаправляются к серверу с наименьшим числом активных соединений и наименьшим средним временем ответа (с учетом весов). При методе балансировки нагрузки random запросы перенаправляются на случайно выбранный сервер (с учетом весов) [6].

Метод балансировки нагрузки least\_conn:

```
upstream backend {
least_conn;
server backend-1.example.com weight=2;
server backend-2.example.com;
server backend-N.example.com;
}
```

### Добавление серверов кэширования

Во многих системах встречаются медленные операции (SQL запросы или запросы к внешним API). Данные, полученные в результате таких запросов, можно сохранить на определенное время, что позволит выполнять меньше медленных операций и показывать заранее сохраненные данные (рис. 5).

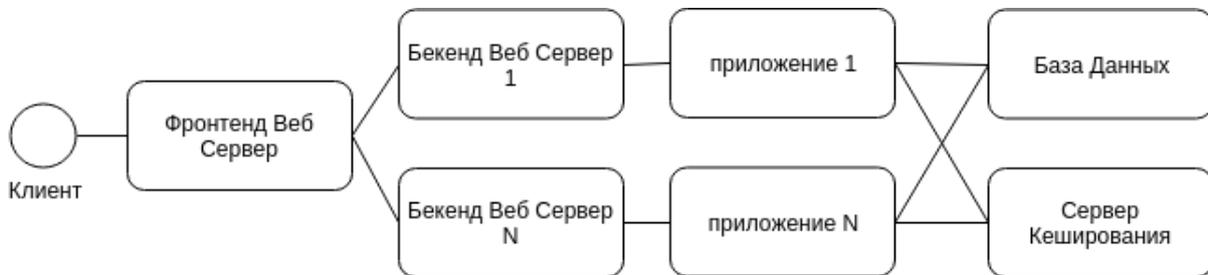


Рисунок 5 – Добавление сервера кэширования

При серьезной нагрузке на систему, необходим отдельный сервер просто необходим, так как и в СУБД, и в большинстве готовых решений для кэширования активно используется оперативная память, и система будет постоянно конкурировать за этот ресурс. К тому же сервер кэширования можно сконфигурировать с упором на оперативную память, как, например, распределенная система кэширования данных Memcached, позволяющая кэшировать данные в оперативной памяти на множестве серверов [7].

При кэшировании данных требуется дать ответ на два основных вопроса: какие данные кэшировать и где. Кэширование происходит на стороне клиента (если клиент использует веб браузер), на стороне прокси сервера или сети доставки контента (CDN, Content Delivery Network), непосредственно на стороне http сервера или на сервере кэширования. Рассмотрим кэширование на стороне кэш сервера, обратимся к принципу Парето. На этом принципе основана идея компьютерных RISC-процессоров – правило 20/80 в применении к работе процессора: “в течение 80% времени работы процессор выполняет 20% от общего числа реализованных в нем команд”. Иными словами, кэшировать нужно 20% данных, используя 80% времени. Стоит учесть, что действительное распределение вклада большей и меньшей части факторов в реальной ситуации может отличаться и не обязательно равно 20/80. Обычно это такие данные, как результаты выборок из базы данных, результаты запросов к внешним сервисам, статический контент, пользовательские сессии и другие временные данные [8].

При реализации кэширования необходимо принимать во внимание достоверность данных. Высокая частота попаданий (hit), т.е. наличие запрашиваемых данных в КЭШе обеспечивает эффективность кэша. Большое количество промахов кэша (miss) свидетельствует о неэффективности реализации кэширования. Механизм ограничения времени жизни – TTL (time to live) применяется для удаления неактуальных данных из кэша.

Ниже приведен пример работы с сервисом memcached на языке golang с использованием библиотеки gomemcache

```

import (
    "github.com/bradfitz/gomemcache/memcache"

```

```
"fmt"  
)  
func main() {  
    // Подключение к серверам memcached  
    memcached := memcache.New("10.0.0.1:11211", "10.0.0.2:11211",  
        "10.0.0.3:11212")  
  
    // Установка значений  
    memcached.Set(&memcache.Item{Key: "key_1", Value:  
        []byte("one")})  
    memcached.Set(&memcache.Item{Key: "key_2", Value:  
        []byte("two")})  
  
    // получение значения  
    val, err := memcached.Get("key_1")  
  
    if err != nil {  
        // Обработка ошибки  
        fmt.Println(err)  
        return  
    }  
}
```

При обновлении кэша очень важно блокировать запись в кэше, чтобы другие процессы не начинали строить запись, если один процесс этим уже занимается. В memcached нет встроенного механизма блокировок, поэтому требуется создать флаг как отдельную запись, которая будет указывать на то, что запись строится. Как только запись построена, флаг блокировки нужно снять, чтобы процессы, находящиеся в ожидании этой записи, могли ее прочитать.

### Очереди задач

Приложение передает задачи серверу очереди (рис. 6). Сервер очереди хранит список задач (инструкций). Сервер задач передает инструкции обработчику. Обработчик (worker) – это часть основной программы. Медленный участок программы переносится в обработчик. В основном приложении этот участок заменяется на отправку сообщения в очередь. Очереди задач позволяют выполнять операции асинхронно, не замедляя основного приложения.

Для организации работы с простой системой очередей может использоваться сервер очередей Gearman [9].

Gearman имеет множество готовых решений в виде библиотек для использования с различными языками программирования. Построенное с участием данной системы очередей решение включает в себя три компонента – клиент, система очередей, обработчик (рис. 7). Клиент отправляет сообщения в систему очередей, обработчик получает сообщения от менеджера очередей и выполняет заданные действия.

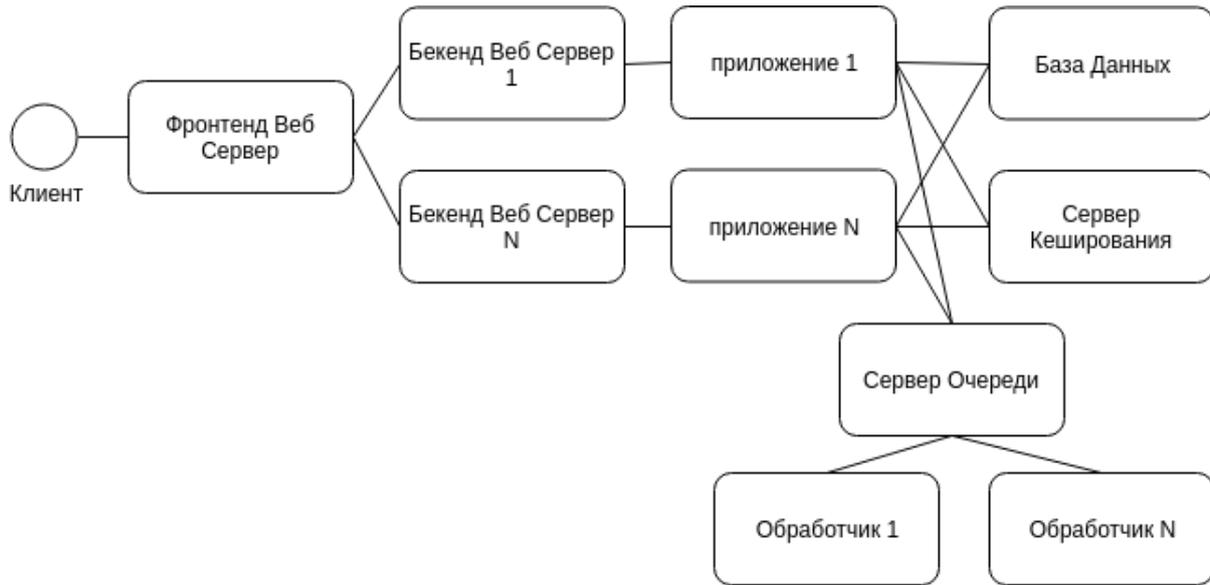


Рисунок 6 –Добавление сервера очереди

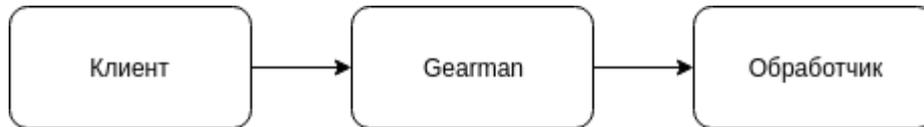


Рисунок 7. Решение, построенное с участием Gearman

Для построения очередей могут быть использованы и другие системы: RabbitMQ – программный брокер сообщений на основе стандарта AMQP, Apache Kafka – распределённый программный брокер сообщений, проект с открытым исходным кодом, разрабатываемый в рамках фонда Apache, beanstalkd – менеджер заданий распределенного приложения, который собирает отложенные задачи (отправка почты, различные запросы рода), ZeroMQ – высокопроизводительная асинхронная библиотека обмена сообщениями. Поддерживается в большом количестве языков программирования, в том числе в Python, Perl, Erlang и JavaScript (Node.js) и во множестве других, более экзотических. Написана на C++.

### Балансировка DNS

DNS сервер – первый узел, который принимает прямой запрос на преобразование имени (символьного адреса) хоста в его IP-адрес. Дополнительный уровень балансировки нагрузки можно создать при помощи DNS сервера. Например, Round-Robin – для организации балансировки требуется указывать более одного IP адреса в записях типа A. Каждый новый клиент будет получать N+1 в списке IP-адресов. Это позволит распределить нагрузку между несколькими серверами, которые обслуживают приложение. Так как IP адреса доменов кэшируются, необходимо использовать механизм отказоустойчивости и устанавливать небольшое значение ttl (time to live) для кэширования IP адресов. При разбросе пользователей по разным локациям возможно использовать GEO DNS. DNS серверы позволяют отдавать разные IP адреса для клиентов с учетом их местоположения. Пример масштабирования системы с DNS приведен на рис. 8.

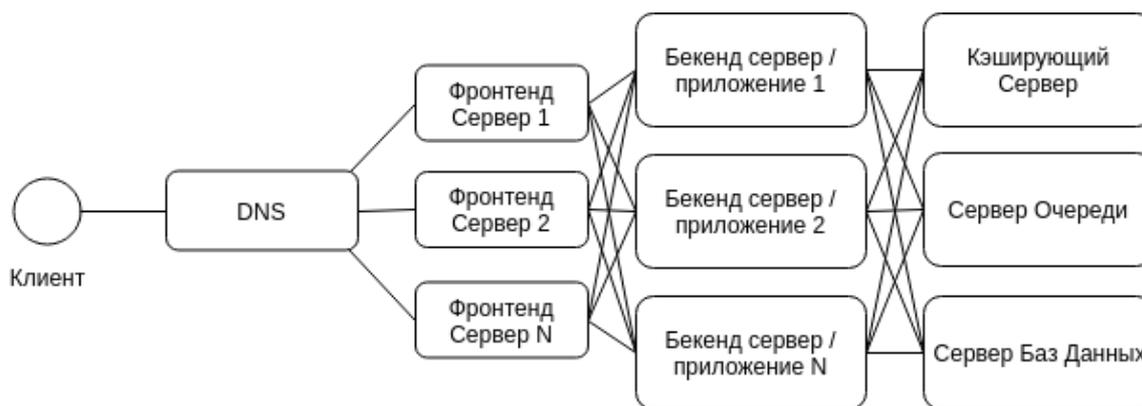


Рисунок 8 – Пример масштабирования системы с DNS балансировщиком

При использовании метода Round-Robin балансировки нагрузки указывается более одного IP адреса в A записях DNS сервера:

```

example.com IN A 10.0.0.1
example.com IN A 10.0.0.2
example.com IN A 10.0.0.3
  
```

Пример конфигурации Bind GeoDNS:

```

view "west" {
match-clients {
country_US; country_CA;
};
recursion no;
zone "example.com" {
type master;
file "west/example.west.db";
};
};
view "default" {
zone "example.com" {
file "default/example.db";
type master;
};
};
  
```

### Хранение файлов

Загрузка, обработка и хранение файлов осуществляются в приложении. При масштабировании нецелесообразно (загрузка и обработка файлов может сильно снизить производительность) хранить файлы на серверах приложений. Для этого используются файловые хранилища. На практике – на каждом сервере должно быть приложение, которое отвечает за загрузку и обработку файлов. Масштабирование реализуется путем добавления новых серверов, как показано на рис. 9.

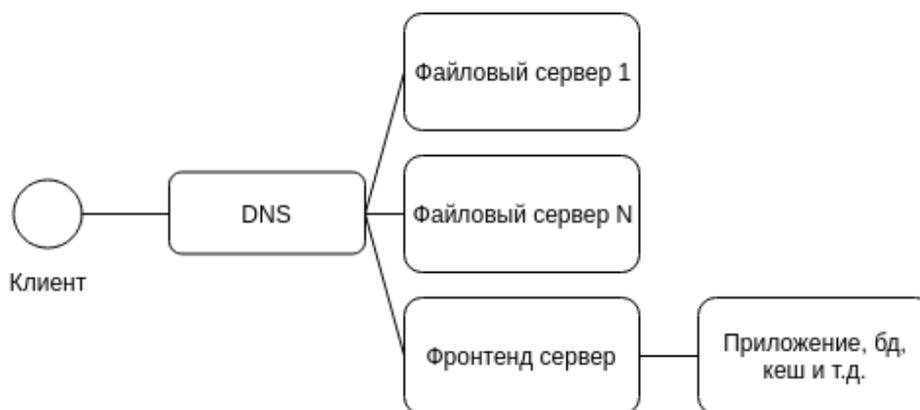


Рисунок 9 – Пример добавления файловых серверов

**Заключение.** Методы повышения производительности любой системы должны рассматриваться с учетом особенностей ее назначения и архитектуры. Следует учитывать пиковые и средние нагрузки, географическое положение пользователей, скорость передачи данных. Оптимизация и горизонтальное масштабирование позволят сократить финансирование на оборудование, энергию и поддержку системы. Не существует универсального рецепта, решение о необходимости расширения должно приниматься на основе достоверной информации о текущем состоянии системы, всестороннего анализа и продуманной стратегии расширения. Необходимо постоянно проводить мониторинг, сбор статистики и нагрузочное тестирование, а в облачных системах [10] это жизненно важно. Растущая система всегда требует изменений, и со временем можно постепенно перейти на микросервисную архитектуру. К масштабированию следует прибегать и в случаях, когда код полностью оптимизирован, например, следует заменить ORM (инструмент объектно-ориентированного представления баз данных) в системе на прямые запросы к СУБД или оптимизировать работу с блокирующими операциями. Набор наиболее удачных методов для каждой системы будет разным.

### Литература

1. Business Insider - <https://www.businessinsider.com/internet-of-things-report?IR=T> (дата обращения: 31.05.2019).
2. IoT Analytics - <https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-update-q1-q2-2018-number-of-iot-devices-now-7b/> (дата обращения: 31.05.2019).
3. Gartner - <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-11-07-gartner-identifies-top-10-strategic-iot-technologies-and-trends> (дата обращения: 31.05.2019).
4. Intel - <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/images/iot/guide-to-iot-infographic.png> (дата обращения: 31.05.2019).
5. IBM Redbook: The RS/6000 SP Inside Out, id: SG24-5374-00.– С.15.
6. [http://nginx.org/en/docs/http/nginx\\_http\\_upstream\\_module.html](http://nginx.org/en/docs/http/nginx_http_upstream_module.html) (дата обращения: 31.05.2019)
7. <https://www.linuxjournal.com/article/7451> (дата обращения: 31.05.2019).
8. <https://github.com/memcached/memcached/blob/master/doc/protocol.txt> (дата обращения: 31.05.2019).
9. <http://gearman.org/> (дата обращения: 31.05.2019).
10. Гайдамако В.В. инфраструктура Sensor-Cloud – облачные информационно-измерительные системы // Проблемы автоматизации и управления – 2018. – №2 (35). – С. 109–111.

*Ж.Н. Кутунаев, zh.kutunaev@mail.ru, А.Р. Такеева*  
*Ошский технологический университет им.акад.М.М. Адышева, г.Ош,*

## ОБОБЩЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ВОЛНОВЫХ УРАВНЕНИЙ ОДНОГО КЛАССА

Многие задачи математической физики приводят к дифференциальным уравнениям с частными производными. В настоящей работе изучается разрешимость специального гиперболического уравнения. Рассмотрены четыре случая параметра  $\lambda$  для получения решения заданных модельных задач, использованы тригонометрические ряды и интеграл Фурье.

Ключевые слова: смешанная задача; уравнение гиперболического типа; струны; интеграл Фурье; тригонометрические ряды; граничное условие; дифференциальные уравнения; нечетные и четные функции.

**Постановка задачи.** Рассмотрим смешанную задачу [1–3]

$$u_{tt} = u_{xx} + (\beta_1 - \beta_2)u_x + (\beta_1 - \beta_2)u_t - \beta_1\beta_2u, \quad 0 < x, t < +\infty, \quad (1)$$

$$a_1[u_{tt}(0, t) - (\beta_1 + \beta_2)u_t(0, t)] + a_2u_x(0, t) + a_3u(0, t) = 0, \quad 0 < t < +\infty, \quad (2)$$

$$u(x, 0) = 0, \quad u_t(x, 0) = f(x), \quad 0 < x < +\infty, \quad (3)$$

где  $a_i (i = \overline{1,3})$  – постоянные числа;  $f(x)$  – заданная функция.

Как отмечено выше, функция

$$u(x, t) = e^{\beta_1 t} \varphi(x + t) - e^{\beta_2 t} \varphi(x - t) \quad (4)$$

удовлетворяет уравнению (1) при начальном условии  $u(x, 0) = 0$ ,  $\varphi$  – произвольная дважды дифференцируемая функция.

Подставляя (4) в (2), получаем

$$a_1 \varphi''(t) + [a_1(\beta_1 - \beta_2) + a_2] \varphi'(t) + (a_3 - a_1\beta_1\beta_2) \varphi(t) - \\ - e^{(\beta_2 - \beta_1)t} \{ a_1 \varphi''(-t) + [a_1(\beta_1 - \beta_2) + a_2] \varphi'(-t) + (a_3 - a_1\beta_1\beta_2) \varphi(-t) \} = 0. \quad (5)$$

Функцию  $\varphi(z)$ , удовлетворяющую функционально-дифференциальному уравнению (5), будем искать в виде [2]

$$\varphi(z) = e^{mz} + ke^{nz}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), убеждаемся, что функция (6) удовлетворяет уравнению (5), если  $m, n, k$  удовлетворяют системе алгебраических уравнений [4]

$$k = \left. \begin{aligned} m + n &= \beta_2 - \beta_1, \\ \frac{a_1 m^2 + [a_1(\beta_1 - \beta_2) + a_2]m + (a_3 - a_1)\beta_1\beta_2}{a_1 n^2 + [a_1(\beta_1 - \beta_2) + a_2]n + (a_3 - a_1)\beta_1\beta_2} \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Чтобы удовлетворить начальное условие  $u_t(x, 0) = f(x)$ , нужно иметь бесконечное множество частных решений уравнения (1), удовлетворяющих граничному условию (2). Для этого решение системы (7) нужно искать в виде комплексных чисел. Задав

$$m = \frac{1}{2}(\beta_2 - \beta_1) + \frac{1}{2}\lambda i, \quad n = \frac{1}{2}(\beta_2 - \beta_1) - \frac{1}{2}\lambda i, \quad (8)$$

где  $\lambda$  – произвольное вещественное число, тогда согласно (6) найдем функцию  $\varphi_\lambda(z)$ , соответствующую значению  $\lambda$  [3]

$$\varphi_\lambda(z) = e^{\frac{1}{2}(\beta_2 - \beta_1)z} \left( e^{\frac{1}{2}\lambda z} + \frac{P_\lambda + a_2\lambda i}{P_\lambda - a_2\lambda i} e^{-\frac{1}{2}\lambda z} \right),$$

где  $P_\lambda$  – является четной функцией от  $\lambda$  и определяется ниже. По аналогии с выполненными для (6) преобразованиями функцию  $\varphi_\lambda(z)$  можно окончательно представить следующим образом:

$$\varphi_\lambda(z) = e^{\frac{1}{2}(\beta_2 - \beta_1)z} \cos\left(\frac{1}{2}(\lambda z - \theta_\lambda)\right), \quad (9)$$

где  $\theta_\lambda$  – пока неопределенное вещественное число.

Далее, согласно (4), построим функцию  $u_\lambda(x, t)$ , удовлетворяющую уравнению (1) и начальному условию  $u_\lambda(x, 0) = 0$ :

$$\begin{aligned} u_\lambda(x, t) &= e^{\beta_1 t} \varphi(x+t) - e^{\beta_2 t} \varphi(x-t) = e^{\beta_1 t} e^{\frac{1}{2}(\beta_2 - \beta_1)(x+t)} \cos\left(\frac{1}{2}(\lambda(x+t) - \theta_\lambda)\right) - \\ &\quad - e^{\beta_2 t} e^{\frac{1}{2}(\beta_2 - \beta_1)(x-t)} \cos\left(\frac{1}{2}(\lambda(x-t) - \theta_\lambda)\right) = \\ &= -e^{\frac{1}{2}[(\beta_2 - \beta_1)x + (\beta_2 + \beta_1)t]} \sin\left(\frac{1}{2}\lambda(x - \theta_\lambda)\right) \sin\left(\frac{1}{2}\lambda t\right). \end{aligned}$$

Таким образом, функции

$$u_\lambda(x, t) = A e^{\frac{1}{2}[(\beta_2 - \beta_1)x + (\beta_2 + \beta_1)t]} \sin\left(\frac{1}{2}\lambda(x - \theta_\lambda)\right) \sin\left(\frac{1}{2}\lambda t\right) \quad (10)$$

удовлетворяют уравнению (1), граничному условию (2) и начальному условию  $\varphi_\lambda(x, 0) = 0$  для любого вещественного  $\lambda$ , где  $A$  – произвольное постоянное число;  $\theta_\lambda$  определяется из системы (1) – (3) после подстановки в нее (10).

В случае ограниченной струны  $\lambda$  принимают только дискретные значения. А в полуограниченной струне все значения  $\lambda$  являются допустимыми. Следовательно, вместо суммирования по дискретным значениям  $\lambda$ , в случае [7], необходимо применить интегрирование по параметру  $\lambda$ , считая, что  $A$  зависит от  $\lambda$ :  $A = A(\lambda)$ .

Таким образом, получим [1]:

$$u(x, t) = e^{\frac{1}{2}[(\beta_2 - \beta_1)x + (\beta_2 + \beta_1)t]} \int_{-\infty}^{+\infty} A(\lambda) \sin\left(\frac{1}{2}\lambda(x - \theta_\lambda)\right) \sin\left(\frac{1}{2}\lambda t\right) d\lambda,$$

или, используя (10),

$$u(x, t) = e^{\frac{1}{2}[(\beta_2 - \beta_1)x + (\beta_2 + \beta_1)t]} \times \int_{-\infty}^{+\infty} A(\lambda) \left( \cos \frac{\theta_\lambda}{2} \sin \left( \frac{1}{2} \lambda t \right) - \sin \frac{\theta_\lambda}{2} \cos \left( \frac{1}{2} \lambda t \right) \right) \sin \left( \frac{1}{2} \lambda t \right) d\lambda, \quad (11)$$

где

$$\cos \frac{\theta_\lambda}{2} = \frac{P_\lambda}{\pm \sqrt{P_\lambda^2 + \lambda^2 a_2^2}}, \quad \sin \frac{\theta_\lambda}{2} = \frac{a_2 P_\lambda}{\pm \sqrt{P_\lambda^2 + \lambda^2 a_2^2}}.$$

Решение задачи (1) – (3) построим для случая параметра  $\lambda$

$$\cos \frac{\theta_\lambda}{2} = \frac{P_\lambda}{\sqrt{P_\lambda^2 + \lambda^2 a_2^2}}, \quad \sin \frac{\theta_\lambda}{2} = \frac{a_2 P_\lambda}{\sqrt{P_\lambda^2 + \lambda^2 a_2^2}}.$$

Остальные случаи:

$$\begin{aligned} \cos \frac{\theta_\lambda}{2} &= \frac{P_\lambda}{\sqrt{P_\lambda^2 + \lambda^2 a_2^2}}, & \sin \frac{\theta_\lambda}{2} &= \frac{a_2 P_\lambda}{-\sqrt{P_\lambda^2 + \lambda^2 a_2^2}}, \\ \cos \frac{\theta_\lambda}{2} &= \frac{P_\lambda}{-\sqrt{P_\lambda^2 + \lambda^2 a_2^2}}, & \sin \frac{\theta_\lambda}{2} &= \frac{a_2 P_\lambda}{-\sqrt{P_\lambda^2 + \lambda^2 a_2^2}}, \\ \cos \frac{\theta_\lambda}{2} &= \frac{P_\lambda}{-\sqrt{P_\lambda^2 + \lambda^2 a_2^2}}, & \sin \frac{\theta_\lambda}{2} &= \frac{a_2 P_\lambda}{\sqrt{P_\lambda^2 + \lambda^2 a_2^2}} \end{aligned}$$

исследуются аналогично.

Итак, в первом случае функция (11) принимает вид

$$u(x, t) = e^{\frac{1}{2}[(\beta_2 - \beta_1)x + (\beta_2 + \beta_1)t]} \times \int_{-\infty}^{+\infty} A(\lambda) \frac{P_\lambda \sin \left( \frac{1}{2} \lambda x \right) - a_2 \lambda \cos \left( \frac{1}{2} \lambda x \right)}{\sqrt{P_\lambda^2 + \lambda^2 a_2^2}} \sin \left( \frac{1}{2} \lambda t \right) d\lambda. \quad (12)$$

Функция  $A(\lambda)$  должна определяться из начального условия  $u_t(x, 0) = f(x)$ , что дает

$$e^{\frac{1}{2}(\beta_1 - \beta_2)x} f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\lambda}{2} A(\lambda) \left[ \frac{P_\lambda \sin \left( \frac{1}{2} \lambda x \right) - a_2 \lambda \cos \left( \frac{1}{2} \lambda x \right)}{\sqrt{P_\lambda^2 + \lambda^2 a_2^2}} \right] d\lambda. \quad (13)$$

Заметим теперь, что если какая-нибудь функция  $\psi(x)$  представима интегралом Фурье, то, как известно [5],

$$\psi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{+\infty} \left( \int_0^{+\infty} \psi(s) \cos(\alpha x) ds \right) \cos(\alpha x) d\alpha + \frac{1}{2\pi} \int_0^{+\infty} \left( \int_0^{+\infty} \psi(s) \sin(\alpha x) ds \right) \sin(\alpha x) d\alpha. \quad (14)$$

При  $\psi(x)$  четном формула (14) принимает вид

$$\psi(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \left( \int_0^{\infty} \psi(s) \cos(\alpha x) ds \right) \cos(\alpha x) d\alpha. \quad (15)$$

Если же  $\psi(x)$  нечетно, то

$$\psi(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \left( \int_0^{\infty} \psi(s) \sin(\alpha x) ds \right) \sin(\alpha x) d\alpha. \quad (16)$$

Сравнивая (13 и (14), видим, что

$$\frac{\lambda A(\lambda) P_\lambda}{2\sqrt{P_\lambda^2 + \lambda^2 a_2^2}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{\frac{1}{2}(\beta_1 - \beta_2)s} f(s) \sin\left(\frac{\lambda}{2}s\right) ds, \quad (17)$$

$$\frac{\lambda^2 A(\lambda) a_2}{-2\sqrt{P_\lambda^2 + \lambda^2 a_2^2}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{\frac{1}{2}(\beta_1 - \beta_2)s} f(s) \cos\left(\frac{\lambda}{2}s\right) ds. \quad (18)$$

Если функция  $e^{\frac{1}{2}(\beta_1 - \beta_2)x} f(x)$  – четна, то интеграл, стоящий в правой части (17), равен нулю и, следовательно,  $A(\lambda)$  определяется из равенства (18) [6]:

$$A(\lambda) = -\frac{2\sqrt{P_\lambda^2 + \lambda^2 a_2^2}}{\lambda^2 \pi a_2} \int_0^{\infty} e^{\frac{1}{2}(\beta_1 - \beta_2)s} f(s) \cos\left(\frac{\lambda}{2}s\right) ds. \quad (19)$$

Подставляя (19) в (12), получим решение задачи (1) – (3):

$$u_1(x, t) = \frac{2}{\pi} e^{\frac{1}{2}[(\beta_2 - \beta_1)x + (\beta_2 + \beta_1)t]} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \left( \int_0^{\infty} e^{\frac{1}{2}(\beta_1 - \beta_2)s} f(s) \cos\left(\frac{\lambda s}{2}\right) ds \right) \times \right. \\ \left. \times \frac{\cos\left(\frac{\lambda x}{2}\right)}{\lambda} - \frac{P_\lambda}{a_2 \lambda^2} \sin\left(\frac{\lambda x}{2}\right) \right\} \sin\left(\frac{\lambda t}{2}\right) d\lambda$$

или, принимая во внимание четность подынтегрального выражения, как функции от  $\lambda$ :

$$u_1(x, t) = \frac{4}{\pi} e^{\frac{1}{2}[(\beta_2 - \beta_1)x + (\beta_2 + \beta_1)t]} \int_0^{+\infty} \left\{ \left( \int_0^{\infty} e^{\frac{1}{2}(\beta_1 - \beta_2)s} f(s) \cos\left(\frac{\lambda s}{2}\right) ds \right) \times \right. \\ \left. \times \frac{\cos\left(\frac{\lambda x}{2}\right)}{\lambda} - \frac{P_\lambda}{a_2 \lambda^2} \sin\left(\frac{\lambda x}{2}\right) \right\} \sin\left(\frac{\lambda t}{2}\right) d\lambda. \quad (20)$$

Если же функция  $e^{\frac{1}{2}(\beta_1 - \beta_2)x} f(x)$  – нечетна, то интеграл в правой части (18) равен нулю и, следовательно,  $A(\lambda)$  определяется из равенства (17):

$$A(\lambda) = \frac{2\sqrt{P_\lambda^2 + \lambda^2 a_2^2}}{\lambda \pi P_\lambda} \int_0^{\infty} e^{\frac{1}{2}(\beta_1 - \beta_2)s} f(s) \sin\left(\frac{\lambda}{2}s\right) ds. \quad (21)$$

Подставляя (21) в (12), получим решение задачи (1) – (3):

$$u_2(x, t) = \frac{2}{\pi} e^{\frac{1}{2}[(\beta_2 - \beta_1)x + (\beta_2 + \beta_1)t]} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \left( \int_0^{\infty} e^{\frac{1}{2}(\beta_1 - \beta_2)s} f(s) \sin\left(\frac{\lambda s}{2}\right) ds \right) \frac{\sin\left(\frac{\lambda x}{2}\right)}{\lambda} \right. \\ \left. - \frac{a_2}{P_\lambda} \cos\left(\frac{\lambda x}{2}\right) \right\} \sin\left(\frac{\lambda t}{2}\right) d\lambda$$

или, выделив нечетность подынтегральной функции, как функции от  $\lambda$ :

$$u_2(x, t) = \frac{4}{\pi} e^{\frac{1}{2}[(\beta_2 - \beta_1)x + (\beta_2 + \beta_1)t]} \int_0^{+\infty} \left\{ \left( \int_0^{\infty} e^{\frac{1}{2}(\beta_1 - \beta_2)s} f(s) \sin\left(\frac{\lambda s}{2}\right) ds \right) \times \right. \\ \left. \times \frac{\sin\left(\frac{\lambda x}{2}\right)}{\lambda} - \frac{a_2}{P_\lambda} \cos\left(\frac{\lambda x}{2}\right) \right\} \sin\left(\frac{\lambda t}{2}\right) d\lambda. \quad (22)$$

**Пример.** Найти решение модели [7]

$$\left. \begin{aligned} &u_{tt} = u_{xx}, \quad 0 < x, t < \infty, \\ &\text{при заданных граничных условиях} \\ &u_{tt} - u_t + 3u_x + \frac{15}{4}u = 2\sin 5t, \quad x = 0, \quad 0 < t < \infty, \\ &u(x, 0) = 0, \quad u_t(x, 0) = 1 \end{aligned} \right\}. \quad (23)$$

**Решение.** Задача (23) приводит к задаче Коши для неоднородного функционально-дифференциального уравнения

$$\varphi''(z) + 2\varphi'(z) + \frac{15}{4}\varphi(z) - 2\varphi''(-z) - 8\varphi'(-z) - \frac{15}{2}\varphi(-z) = 2\sin 5z$$

при начальных условиях  $\varphi(0) = 0, \varphi'(0) = 1$ . Частными решениями однородного уравнения будут

$$\varphi_1(z) = e^{\frac{1}{2}\sqrt{5}z} + 6.8544e^{-\frac{1}{2}\sqrt{5}z}, \quad \varphi_2(z) = e^{\frac{3}{2}\sqrt{5}z} + 6.8544e^{-\frac{3}{2}\sqrt{5}z}.$$

Частное решение неоднородного уравнения имеем в виде

$$\Phi(z) = -0.021\cos 5z - 0.0148\sin 5z.$$

Решая задачу Коши, получаем

$$\varphi(z) = 0.086\left(e^{\frac{z}{2}\sqrt{5}} + 6.8544e^{-\frac{z}{2}\sqrt{5}}\right) - 0.0833\left(e^{\frac{3}{2}\sqrt{5}z} + 6.8544e^{-\frac{3}{2}\sqrt{5}z}\right) - \\ -0.021\cos 5z - 0.0148\sin 5z.$$

Решение исходной задачи (23) имеет вид

$$u(x, t) = 0.086\left(e^{\frac{1}{2}\sqrt{5}(x+t)} + 6.8544e^{-\frac{1}{2}\sqrt{5}(x+t)}\right) - 0.0833\left(e^{\frac{3}{2}\sqrt{5}(x+t)} + 6.8544e^{-\frac{3}{2}\sqrt{5}(x+t)}\right) - \\ -0.021\cos 5(x+t) - 0.0148\sin 5(x+t) + 0.1721\left(e^{\frac{1}{2}\sqrt{5}(x-t)} + 6.8544e^{-\frac{1}{2}\sqrt{5}(x-t)}\right) - \\ -0.1668\left(e^{\frac{3}{2}\sqrt{5}(x-t)} + 6.8544e^{-\frac{3}{2}\sqrt{5}(x-t)}\right) - 0.0414\cos 5(x-t) + 0.0297\sin 5(x-t).$$

**Заключение.** Разработанным методом решены задачи о колебаниях ограниченной и полугораниченной струны с граничными условиями общего вида. Кроме того, уравнение гиперболического типа рассматривается в более общей формулировке. Отметим, что поставленные задачи не могут быть решены, например, методом разделения переменных. Если струна ограничена, то решение получено в виде ряда тригонометрических функций, а для полугораниченной струны решения выражаются через интеграл Фурье.

### *Литература*

1. А.А. Самарский, А.П. Михайлов. Математическое моделирование. – М.: Физматлит –2005, 313 с.
2. Я.С. Бугров, С.М. Никольский. Дифференциальные уравнения. – Ростов-на-Дону 1991. 506 с.
3. Я. Ацель, Ж.Домбр. Функциональные уравнения с несколькими переменными. – М.: Физматлит. – 2003, 428 с.
4. Турумбеков А, Кутунаев Ж.Н. Об одной смешанной задаче для уравнения Лапласа // Известия КГТУ им. Раззакова.– 2006.–№8. – С. 91–96.
5. В.С. Владимиров. Уравнения математической физики. – М.: 1991, 400 с.
6. А.Н.Тихонов, А.А. Самарский. Уравнения математической физики. – М.: Наука-1977, 736 с.
7. Кутунаев Ж.Н. Решение модельных задач с помощью уравнения гиперболического типа с переменными коэффициентами // Проблемы автоматизации и управления.– 2017. – №1 (32). – С. 11–14.

*С.Н.Верзунов, [verzunov@hotmail.com](mailto:verzunov@hotmail.com),*

*Н.М.Лыченко, [nlychenko@mail.ru](mailto:nlychenko@mail.ru)*

*Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР,  
Бишкек, Кыргызстан*

## **АНАЛИЗ И ARIMA-МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ PM2.5 В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ Г.БИШКЕК**

Представлен анализ результатов наблюдений за содержанием PM2.5 в воздухе г. Бишкек. Выявлены два периода в данных, определяемых окончанием отопительного сезона в городе. Проведена декомпозиция периодов временного ряда наблюдений на трендовые, сезонные и хаотические составляющие. Проведен спектральный анализ исходных данных, позволивший установить суточную и 12-ти часовую периодичность в изменениях концентраций. Предложены ARIMA-модели динамики изменения концентраций PM2.5 для каждого из периодов исходного временного ряда.

Ключевые слова: ARIMA-модель, декомпозиция нестационарного временного ряда, концентрация PM2.5.

**Введение.** Загрязнение воздуха является предметом многих экологических исследований в связи с продолжающейся урбанизацией и индустриализацией современного мира. Основными загрязнителями воздуха в городских районах являются диоксид углерода (CO<sub>2</sub>), оксид углерода (CO), диоксид азота (NO<sub>2</sub>), оксид азота (NO) и твердые частицы PM2.5, PM10 (PM – от англ. particulate matter). Однако наиболее опасным фактором загрязнения воздуха является PM2.5 – твердые частицы диаметром до 2,5 микрон. Благодаря таким размерам эти частицы остаются в атмосфере в течение более продолжительного периода времени и способны глубоко проникать в нижние отделы легких человека, достигая альвеол. Более мелкодисперсные частицы способны проникать в кровеносные сосуды. Таким образом, вдыхая эти загрязнители при их высоких концентрациях, мы наносим непоправимый ущерб не только легким и бронхам, но и сердечно-сосудистой системе.

В отличие от газовых примесей PM являются, в основном, сложной гетерогенной смесью многих компонентов, причем их свойства (спектр распределения по размерам, химический состав) широко изменяются во времени и пространстве [1]. Выделяют два основных класса вещественного состава атмосферных взвесей: природные и техногенные (антропогенные) [2]. К классу природного происхождения относятся такие неорганические частицы, как частицы минералов коры выветривания, продукты химических реакций в верхних слоях атмосферы, метеорная и вулканическая пыль, а также органические частицы: аэропланктон, пыльца, частицы опавших листьев растений, шерсть животных, насекомые и части их тел, пепел лесных пожаров. Класс частиц техногенного или антропогенного происхождения составляют такие неорганические частицы, как сажа ТЭЦ и котельных, кусочки резины и асфальта, частицы выхлопов автомобилей

(сажа, частицы металлов и их оксидов), выбросы промышленных предприятий, отходы и выбросы строительной индустрии, синтетические волокна, а также органические частицы: выбросы пищевых производств, результаты горения мусора, в том числе сельскохозяйственного.

Частицы с диаметрами менее 10 мкм, и в особенности с диаметрами менее 2,5 мкм, вследствие их медленного естественного выведения из атмосферы характеризуются относительно долгой продолжительностью жизни в атмосфере. Поэтому в литературе (в, [2], например) отмечается весьма значительный вклад фоновой (т. е. на значительном удалении от источников) составляющей в сельских и даже городских концентрациях РМ.

Качество атмосферного воздуха в немалой степени зависит от погодных условий. Синоптические процессы и локальные метеорологические условия во многом определяют поведение поступающих в атмосферу загрязняющих веществ. Исследованию этих закономерностей посвящено большое количество публикаций (например, [3-5]), в которых показано, что высокие уровни содержания загрязняющих веществ наблюдаются в период длительных неблагоприятных метеорологических условий, которым свойственны температурные инверсии, слабые ветры, туманы.

Охрана окружающей среды предполагает не только оценку состояния здоровья населения в данный момент времени, но и прогнозирование последствий влияния загрязняющих веществ на здоровье жителей исследуемого региона. Поэтому задача анализа динамики изменения концентраций вредных веществ и построения моделей для прогноза их содержания в воздухе представляет особый интерес. При этом, желательно, учитывать региональные природные, экономические, антропогенные и климатические особенности территории.

Физико-географические и климатические условия г. Бишкек, а также относительная замкнутость Чуйской долины, как отмечено в [6], способствуют возникновению интенсивных приземных и приподнятых инверсий, что ведет к формированию высокого потенциала загрязнений. Основными источниками загрязнения окружающей среды являются топливно-энергетический комплекс, автотранспорт, промышленные предприятия, бытовые отходы, а в отопительный сезон добавляются выбросы частного сектора. В [7] отмечается, что ежегодно общий объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу Бишкека составляет 240 тысяч тонн.

Однако, анализ литературных источников показал, что, при всей остроте проблемы загрязнения воздуха в Бишкеке, статистическому анализу и прогнозу содержания загрязнений в воздухе города и других районах Кыргызстана должного внимания не уделялось, главным образом, в силу отсутствия открытой базы данных наблюдений за концентрациями веществ в воздухе. Основная задача настоящей статьи – оценить временную изменчивость загрязнения атмосферы в г. Бишкек частицами РМ<sub>2.5</sub> и разработать модели для их краткосрочного прогноза на основе исторических данных, опубликованных на сайте [8]. В качестве моделей выбраны интегрированные модели авторегрессии-скользящего среднего (ARIMA-модели).

**Методы и модели.** Прогнозирование значений РМ<sub>2.5</sub> - непростая проблема, поскольку на загрязнение воздуха могут влиять многие факторы. Многие исследователи от экологии до науки о данных предложили различные решения для моделирования и

прогнозирования загрязнения воздуха с использованием статистических моделей или моделей глубокого обучения. Однако, в настоящее время затруднительно однозначно рекомендовать определенный метод для прогноза загрязнения воздуха с хорошей достоверностью. Анализ и прогнозирование процесса загрязнения, методы обработки информации должны выбираться в зависимости от степени детерминированности объекта.

ARIMA-модели (AutoRegressive Integrated Moving Average model), или интегрированные модели авторегрессии-скользящего среднего, впервые предложенные Боксом и Дженкинсом [9], - наиболее популярные и эффективные статистические модели для прогноза временных рядов. В их основе лежит фундаментальный принцип, что будущие значения временного ряда генерируются некоторой линейной функцией прошлых наблюдений и случайной ошибкой (белым шумом). В силу того, что инерционность во временных рядах загрязнений велика и, несмотря на появление искусственных нейронных сетей, ARIMA-модели широко используют для прогноза загрязнений атмосферного воздуха. Так, например, в [10] ARIMA- техника применена для краткосрочного (максимум на 24 часа) прогноза концентрации CO в атмосферном воздухе, в [11] предложены сезонные ARIMA-модели для прогноза индекса качества воздуха, в [12] ARIMA-техника применена для прогноза загрязнения воздуха NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> и SO<sub>2</sub>.

В общем виде ARIMA(*p, d, q*) модель имеет форму

$$\phi(B)(1-B)^d y_t = \theta(B)\varepsilon_t, \quad (1)$$

где  $y_t$  – значения модельного ряда в момент времени  $t$ ;

$\varepsilon_t$  – случайная ошибка с нулевым средним и постоянной дисперсией;

$\phi(B)$ ,  $\theta(B)$  – полиномы степени  $p$  и  $q$ ,  $B$  – лаговый оператор, с учетом которого

$$By_t = y_{t-1}, \quad B^2 y_t = y_{t-2}, \quad \dots, \quad B^d y_t = y_{t-d}, \quad B^j \varepsilon_t = \varepsilon_{t-j}, \quad j=0, 1, \dots;$$

$d$ - порядок взятия последовательной разности  $\Delta y_t = y_{t-1} - y_t$  (используется для того, чтобы сделать ряд стационарным).

Если  $d=0$ ,  $\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$ ,  $\theta(B) = 1 + \theta_1 B + \theta_2 B^2 + \dots + \theta_q B^q$ , то (1) будет иметь вид:

$$y_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q}.$$

Подходящий порядок ARIMA- модели обычно подбирается в соответствии с методологией построения модели Бокса-Дженкинса [9].

Эта методология включает 3 этапа: идентификацию, параметрическое оценивание и проверку адекватности модели. Основная идея идентификации модели заключается в том, что если временной ряд генерируется из процесса ARIMA, он должен иметь некоторые теоретические автокорреляционные свойства. Сопоставляя эмпирические автокорреляционные паттерны с теоретическими, часто можно идентифицировать одну или несколько потенциальных моделей для данного временного ряда. Бокс и Дженкинс [9] предложили использовать автокорреляционную функцию и частичную автокорреляционную функцию выборки данных в качестве основных инструментов для определения порядка ARIMA-модели. При этом необходимым условием для построения ARIMA-модели является стационарность выборки данных (временного ряда). Стационарный

временной ряд обладает свойством, что его статистический характер не меняется с течением времени, то есть математическое ожидание и дисперсия такого ряда должны быть постоянными, а автокорреляционная функция должна зависеть только от интервала между соответствующими значениями ряда – т.н. лага.

Когда наблюдаемый временной ряд имеет тренд и гетероскедастичность, к нему применяют операцию дифференцирования, то есть вычисляют его первые разности и далее уже строится модель для этого преобразованного ряда. Для определения стационарности временного ряда используют различные методики, в частности, можно воспользоваться расширенным тестом Дики-Фуллера [13], который базируется на идее, что критерием стационарности временного ряда является отсутствие единичных корней полинома  $\phi(B)$ .

После того, как предварительная модель определена, оценивают параметры модели так, чтобы общая мера ошибок сводилась к минимуму. Это можно сделать с помощью процедуры нелинейной оптимизации.

Последним этапом построения модели является диагностическая проверка адекватности модели на основе статистической обработки прогнозных значений ряда и анализа графиков остатков, т.е. разницы между значением ряда  $y_{ft}$  и его предсказанным на модели значением  $y_t$ :  $e_t = y_{ft} - y_t$ . Для оценки точности прогноза используются различные оценки. В частности, достаточно хорошим показателем ошибки прогноза может быть средняя квадратичная ошибка MSE

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (e_t)^2.$$

Если модель не адекватна, должна быть идентифицирована новая предварительная модель. Этот трехэтапный процесс построения модели обычно повторяется несколько раз, пока будет окончательно выбрана удовлетворительная модель. Выбранная модель может быть использована для прогнозирования.

В случае, если нестационарный ВР имеет ярко выраженные тренд и сезонность, он может быть представлен в виде аддитивной модели:

$$y_t = d_t + S_t + x_t, \quad (2)$$

где  $d_t$  – трендовая составляющая (тренд),  $S_t$  – сезонная составляющая (сезонность),  $x_t$  – хаотическая (недетерминированная) составляющая.

Выделение тренда и сезонности может быть выполнено различными способами, например, тренд можно аппроксимировать линейной функцией

$$d_t = d_0 + kt, \quad (3)$$

а сезонность – гармоникой

$$S_t = S_0 \cos(2\pi vt + \varphi), \quad (4)$$

где  $d_0$ ,  $k$ ,  $S_0$ ,  $v$ ,  $\varphi$  – неизвестные параметры, которые можно вычислить, используя метод наименьших квадратов, подобно тому, как это сделано в [14].

Далее, для хаотической составляющей может быть построена ARIMA-модель в соответствии с вышеизложенной методикой.

**Данные и вычислительные эксперименты.** В настоящей работе использованы данные о содержании PM2.5 в атмосферном воздухе г. Бишкек, размещенные на сайте [8]. Данные содержатся в CSV- формате и включают индекс качества воздуха (AQI, Air

Quality Index) и данные о концентрации  $PM_{2.5}$  ( $mg/m^3$ ), начиная с 06.02.19 по настоящее время (период измерения – 1 час).

На рис. 1 представлен график концентраций  $PM_{2.5}$  ( $mg/m^3$ ) за период с 09.02.19 по 31.05.19 с интервалом в 3 часа. Как видно из графика, до 23.03.19 уровень загрязнения воздуха частицами  $PM_{2.5}$  очень высок, среднее значение для этого периода составляет  $44.14 mg/m^3$ , а среднее квадратическое отклонение  $\sigma = 24.06 mg/m^3$  (при этом по нормам ВОЗ среднесуточный уровень  $PM_{2.5}$  должен составлять не более  $25 mg/m^3$ ). Затем средний уровень загрязнения резко падает и составляет  $21.60 mg/m^3$ , среднее квадратическое отклонение тоже уменьшилось:  $\sigma = 8.95 mg/m^3$ . По-видимому, этот скачок связан с прекращением отопительного сезона на городской ТЭЦ [15].

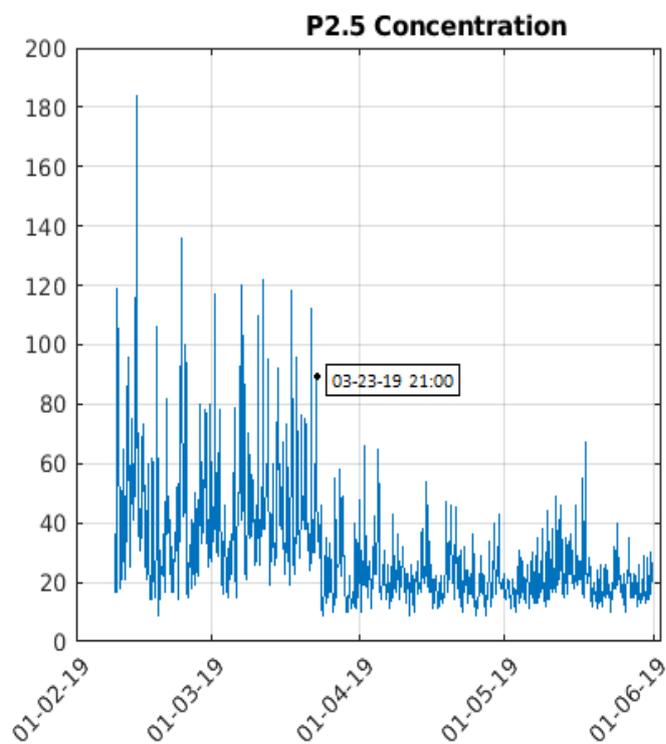


Рисунок 1 – Значения концентраций  $PM_{2.5}$  в период с 9.02.19 по 31.05.19

Временной ряд на рис. 1 явно нестационарный. Этот вывод подтверждает и расширенный тест Дики-Фуллера [13].

Для анализа исходного ряда построены автокорреляционная и частичная автокорреляционная функции (ACF и PACF). Анализ ACF (рис. 2) показывает, что она не затухает быстро, что также характерно для нестационарных ВР, и содержит периодичность в 8 лагов, что соответствует 24 часам. Последний значимый лаг на PACF равен 40, что согласуется с приведенным в [2] фактом, что время оседания частиц  $PM_{2.5}$  составляет 5 суток.

Для получения дополнительной информации о частотном характере временного ряда было выполнено его спектральное разложение, результат которого представлен на рис. 3.

Для всего ряда характерна гармоника с выявленным ранее суточным периодом в 24 часа (частота 0.42) с большей амплитудой в первой части ряда (09.02.19-22.03.19) (линия более яркая). Также для всего ряда отмечаются гармоники с периодами в 12 часов и 6 часов. Стоит отметить, что полученная спектрограмма ряда концентраций  $PM_{2.5}$  представляет большой интерес для анализа процессов, характеризующих загрязнение атмосферного воздуха в городе (например, 12-часовая периодичность изменения загрязнения может быть объяснена транспортным режимом города, суточная периодичность в 24 часа – режимом работы топливно-энергетического комплекса и метеорологическими условиями).

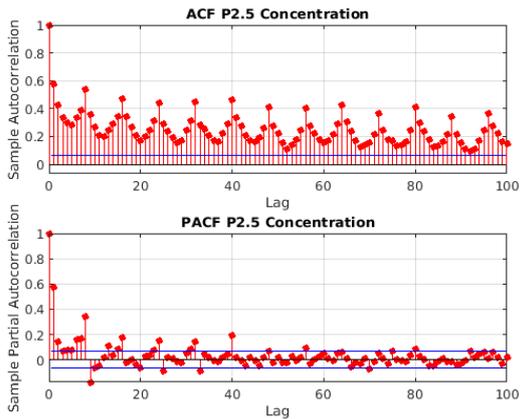


Рисунок 2 – Автокорреляционная и частичная автокорреляционная функции исходного ряда

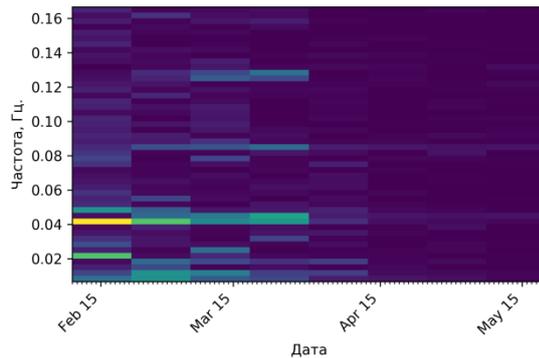


Рисунок 3 – Спектральное разложение исходного ряда

Поскольку ряд нестационарный, имеет два четко выраженных периода и содержит гармонические составляющие, мы произвели декомпозицию исходного ряда на трендовые, сезонные и недетерминированные составляющие (2) для двух периодов, соответственно. Параметры составляющих (3, 4) определены в результате решения нелинейной оптимизационной задачи с использованием пакета MINPACK [16] и представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры детерминированной части ВР

Период ряда	$d_0$	$k$	$S_0$	$\varphi$	$v$
09.02.19-22.03.19	45.94	-0.0029	-12.46	-8.39	1/24
23.03.19-31.05.19	25.87	-0.0045	-2.95	-27.28	1/24

Стоит отметить, что параметры  $d_0$  близки к средним значениям периодов ряда, а периоды ряда имеют небольшой отрицательный линейный тренд, более значимый для второго периода.

На рис. 4 и рис. 5 представлены декомпозиции периодов ряда, соответствующие указанным в табл. 1 параметрам.

Тесты Дики-Фуллера для хаотических (недетерминированных) составляющих показали, что они представляют собой стационарные временные ряды, следовательно, для них могут быть построены ARMA-модели. На рис. 6, и рис. 7 представлены автокорреляционные ACF и частичные автокорреляционные PACF функции недетерминированных составляющих.

На PACF первого периода ряда (рис. 6) можно выделить два последних значимых лага: 32 и 40, на PACF второго периода ряда (рис. 7) последний значимый лаг – 16. Эти значения определяют соответствующие коэффициенты  $p$  в моделях авторегрессии.

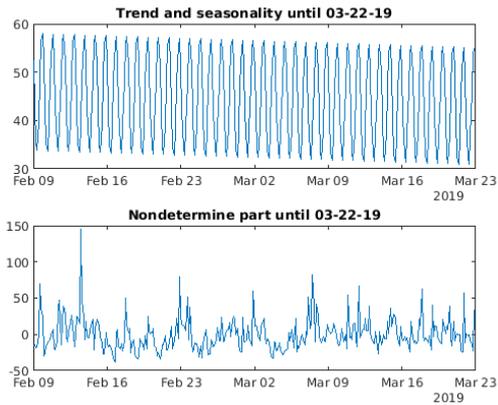


Рисунок 4 – Декомпозиция первого периода ряда

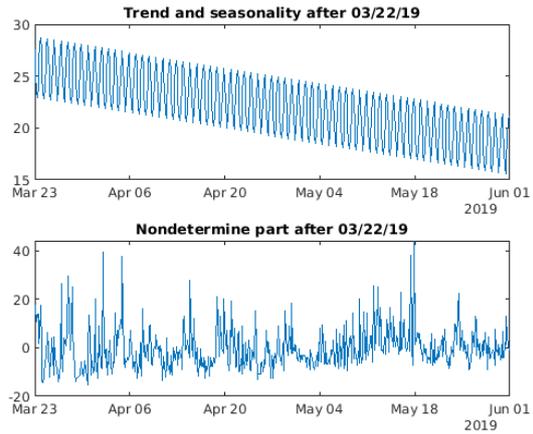


Рисунок 5 – Декомпозиция второго периода ряда

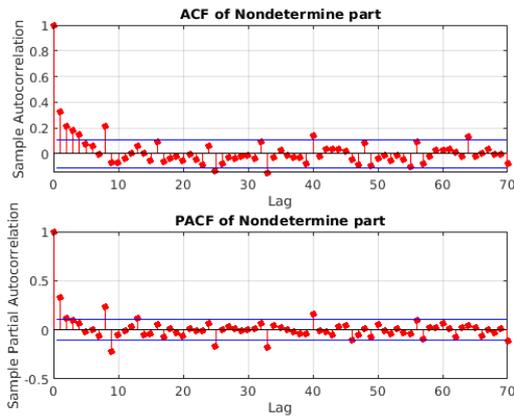


Рисунок 6 – ACF и PACF первого периода ряда

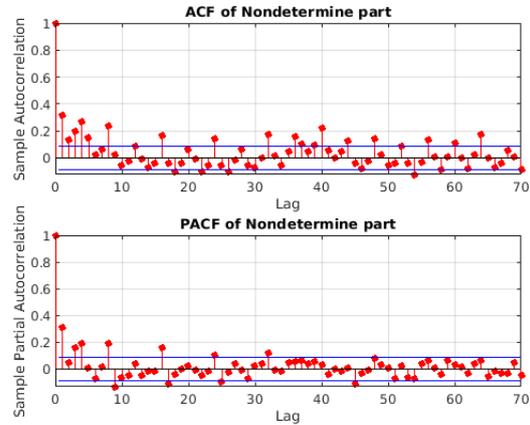


Рисунок 7 – ACF и PACF второго периода ряда

После проведения вычислений с различными значениями коэффициентов  $p, d$  и  $q$  в ARIMA-моделях получены варианты, соответствующие наименьшей ошибке и наилучшему коэффициенту детерминации  $R^2$  (табл. 2). Результаты моделирования концентраций PM2.5 (с шагом 3 часа), полученные с использованием этих моделей, представлены в табл. 2 и на рис. 8.

Таблица 2 – Параметры ARIMA-моделей

Период ряда	$p$	$d$	$q$	$MSE_{ARIMA}$	$m_e$	$MSE_{НП}$
09.02.19-22.03.19	32	0	0	350.09	-0.167	696.23
23.03.19-31.05.19	16	0	0	56.14	-0.0388	102.36

Для сравнения в табл. 2 показаны ошибки модели наивного прогноза  $MSE_{НП}$ , в которой значения текущего отсчета ряда равно значению предыдущего.

АКФ остатков  $e_t$  (разностей реальных и модельных концентраций) для обоих периодов приближена к АКФ белого шума, а гистограмма остатков – к нормальному распределению. Это дает основание предполагать, что в остатках не осталась инфор-

мации, которая может быть использована для улучшения ARIMA-модели. Тем не менее, остатки имеют ненулевое среднее  $m_e$ , следовательно, прогноз, построенный на такой модели, будет несколько смещен.

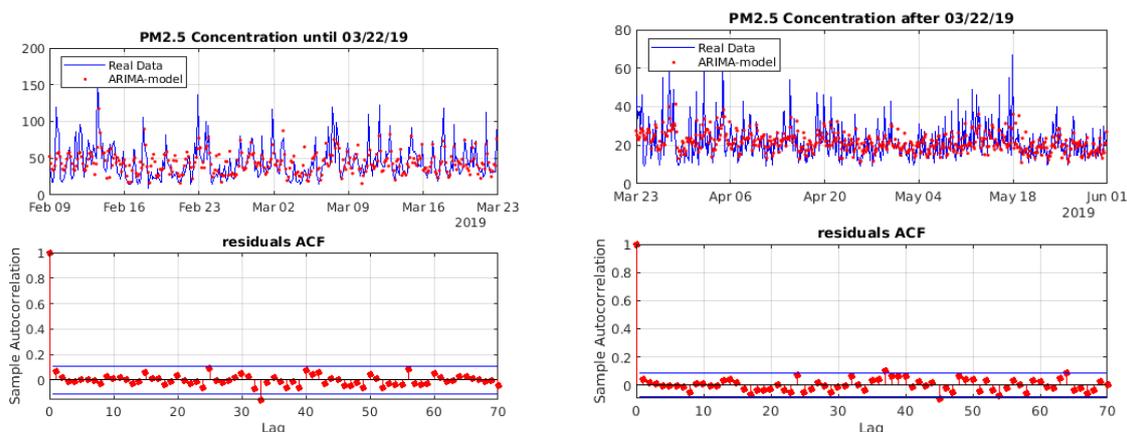


Рисунок 8 – Динамика реальных и модельных концентраций PM2.5 и ACF остатков

**Заключение.** Таким образом, проведенный анализ данных наблюдений за содержанием PM2.5 в воздухе г. Бишкек за период февраль-май 2019 года показал, что есть два периода в уровнях концентраций PM2.5, определяемых, по-видимому, окончанием отопительного сезона в городе. Построенные автокорреляционные и частичные автокорреляционные функции для обоих периодов, а также построенная спектрограмма исходного временного ряда позволяют заключить, что в обоих периодах есть суточная и 12-ти часовая составляющие. Инерционность периода ряда, соответствующего отопительному сезону, составляет четверо суток, инерционность периода ряда после окончания отопительного сезона составляет двое суток. Выявленные закономерности, по-видимому, связаны с антропогенными и климатическими факторами.

Дальнейшее развитие исследований по проблеме построения моделей динамики изменений концентраций загрязняющих веществ должно учитывать метеорологические и другие факторы, влияющие на загрязнение воздуха в городе. В частности, интересным представляется использование множественной регрессии и ИНС. Это позволит одновременно учитывать большое количество влияющих параметров, и наиболее полно отражающие характерные для исследуемой системы причинно-следственные связи между параметрами. Располагая такими моделями и имея прогноз, сделанный на их основе, можно ставить задачу предупреждения неблагоприятной экологической ситуации, используя определения возможности регулирования антропогенных выбросов, ограничивая тем самым негативное воздействие загрязнителей, и не доводя их концентрации критического уровня.

### Литература

1. Юшкин Н.П., Асхабов А.М., Анищенко Л.А. и др. Происхождение биосферы и коэволюция минерального и биологического миров. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2007. – 202 с.
2. Голохвост К.С., Кику П.Ф., Христофорова Н.К. Атмосферные взвеси и экология человека // Экология человека, №10, 2012. – С. 5–10.

3. Gamze Özel Kadılar, Cem Kadılar. Air pollution analysis for Ankara by air pollution index highly correlated with meteorological variables // AIP Conference Proceedings 1991, 020014, 2018; <https://doi.org/10.1063/1.5047887>.
4. Ebru Kavak Akpinar<sup>1</sup>, Sinan Akpinar, Hakan Fehmi Öztop. Statistical analysis of meteorological factors and air pollution at winter months in Elazığ, Turkey // *Journal of Urban and Environmental Engineering*, v.3, n.1, 2009, p. 7–16.
5. Deniz Derya Genç, Canan Yeşilyurt, Banu Bayar, Gürdal Tuncel<sup>1</sup>. Effects of meteorology on Ankara air quality // *Proceedings of the Third International Symposium on Air Quality Management at Urban, Regional and Global Scales*, 2005, pp. 385-392.
6. Осмонбетов К. О., Ырсалиева А. Ж. Экология Бишкека // *Молодой ученый*, №6, 2016. – С. 334–339. URL <https://moluch.ru/archive/110/26945/> (дата обращения: 31.05.2019).
7. Официальный сайт Госагентства охраны окружающей среды и лесного хозяйства При Правительстве КР // <http://ecology.gov.kg/news/view/id/269> (дата обращения: 31.05.2019).
8. AirNow Department of State // [https://airnow.gov/index.cfm?action=airnow.global\\_summary#U.S.\\_Department\\_of\\_State\\_\\$Bishkek](https://airnow.gov/index.cfm?action=airnow.global_summary#U.S._Department_of_State_$Bishkek), (дата обращения: 31.05.2019).
9. Box G.E.P., Jenkins G., *Time Series Analysis, Forecasting and Control*, Holden-Day, San Francisco, CA, 1970. – 453 с.
10. Claudio Guarnaccia, Julia Griselda Ceron Breton, Rosa Maria Ceron Breton, Carmine Tepedino, Joseph Quartieri, and Nikos E. Mastorakis. ARIMA models application to air pollution data in Monterrey, Mexico// *AIP Conference Proceedings* 1982, 020041, 2018; <https://doi.org/10.1063/1.5045447>.
11. Muhammad Hisyam Lee, Nur Haizum Abd. Rahman, Suhartono, Mohd Talib Latif, Maria Elena Nor and Nur Arina Bazilah Kamisan. Seasonal ARIMA for Forecasting Air Pollution Index: A Case Study // *American Journal of Applied Sciences* 9 (4): 570-578, 2012 ISSN 1546-9239, 2012.
12. Abhilash M.S.K., Thakur A., Gupta D., Sreevidya B. Time Series Analysis of Air Pollution in Bengaluru Using ARIMA Model. In: Perez G., Tiwari S., Trivedi M., Mishra K. (eds) *Ambient Communications and Computer Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 696. Springer, Singapore, 2018.
13. MacKinnon, J.G. Critical Values for Cointegration Tests // Queen's University, Dept of Economics, Working Papers, 2010. <http://ideas.repec.org/p/qed/wpaper/1227.html>.
14. Верзунов С.Н., Лыченко Н.М. Мультивейветная полиморфная сеть для прогнозирования геофизических временных рядов // *Проблемы автоматизации и управления*. 2017. – № 1 (32). – С. 78–87.
15. Sputnik Кыргызстан. Отопление в Бишкеке начнут отключать 19 марта // <https://ru.sputnik.kg/society/20190318/1043682953/bishkek-mehriya-otoplenie-zavtra.html>.
16. J.J. Moré, D.C. Sorensen, K.E. Hillstrom, and B.S. Garbow, The MINPACK Project, in *Sources and Development of Mathematical Software*, W.J. Cowell, ed., Prentice-Hall, pages, 1984, pp. 88–111.

## КЫСКАЧА МАЗМУНУ

### **ДИНАМИКАЛЫК СИСТЕМАЛАРДЫ УЮШТУРУУ ЖАНА БАШКАРУУ АР КАНДАЙ АРНАЛЫШТАГЫ ИНЖЕНЕРДИК КОММУНИКАЦИЯЛЫК СЕТТЕРДИ ОПТИМАЛДАШТЫРУУ МАСЕЛЕЛЕРИ / Г.Ы.Токтошов**

Шаа раймагынын коммуникациялар оптималдаштыруу долбоорлонуучу. Жаны модель иштелип чыгып колдонууга сунушталган. Сунуш кылынган методика ар турдуу сеттерди долбоорлоонун коп денгээлдуулугун кылынган жакындаштырылган башка сеттер менен берет

*Негизгисоздор:* ашык схема, инженердик сеть, трасса, алгачкы сеть, экинчи сеть, граф, гиперсеть

### **КҮЧ ТРАНСФОРМАТОРЛОРУНУН ТЕМПЕРАТУРАЛЫК РЕЖИМДЕРИН ТУРУКТАШТЫРУУ АЛГОРИТМИ / Т.П. Самохвалова, Н.Т. Ниязов, Т.К. Сатаркулов, У.А. Сактанов**

Топтолгон параметрлүү системалар үчүн турукташтыруунун жана башкаруунун алгоритмдери түзүлдү. Башкаруу объектиси болуп мажбурлап муздатуу системасы менен иштеген күч трансформатору эсептелет. Алгоритмдер Р. Беллмандын динамикалык программалоо ыкмасына негизделген.

*Ачкыч сөздөр:* оптималдык башкаруу, турукташтыруу, Р. Беллмандын динамикалык программалоо ыкмасы, күч трансформатору, мажбурлап муздатуу системасы.

### **МИКРОГЭСТИН ГИДРОТУРБИНАСЫНЫН ЖЫШТЫКТАРЫН ЖӨНГӨ САЛУУ ЫКМАЛАРЫНА САЛЫШТЫРМАЛУУ ТАЛДОО ЖҮРГҮЗҮҮ ЖАНА АЛАРДЫН МҮНӨЗДӨМӨЛӨРҮН САЛЫШТЫРУУ / А.М. Яблочников**

Азыркы учурда салттуу эмес кайра жаңылануучу энергия булактарына өтүүнүн дүйнөлүк тенденциясы байкалууда. Мындай Концепцияны ишке ашыруу жаңы техникалык жана илимий идеяларысыз элестетүү мүмкүн эмес экендиги белгиленди. Алардын айланууларынын жыштыгын турукташтыруу автоматташтыруу үчүн гидроагрегаттар конструкциясында жөнөкөй техникалык чечимдерди иштеп чыгуу жана тиешелүү түрдө алардын математикалык (компьютердик) моделдерди иштеп чыгуу боюнча изилдөө зарыл.

*Негизги сөздөр:* микроГЭС, гидротурбина, жыштык, жөнгө салуу ыкмалары, айлануу ылдамдыгы, турукташтыруу.

### **ДИНАМИКАЛЫК СИСТЕМАЛАРДЫ ЖАНА ОБЪЕКТТЕРДИ МОДЕЛДӨӨ ЖАНА ДИАГНОСТИКАЛОО**

### **ЖАҢЫ ТИПТЕГИ ГИДРОАГРЕГАТТЫН ДИНАМИКАЛЫК ЖҮРҮШ – ТУРУШУН ДЕМОНСТРАЦИЯЛОО ҮЧҮН MATLAB ЖАНА LABVIEW ПАКЕТТЕРИН КОЛДОНУУ / А.Б. Бакасова, Г.Н. Ниязова, Т.К. Сатаркулов, Ч.М. Бузурманкулова, Ч.К. Дюшеева**

LABVIEW жана MATLAB пакеттеринин өз ара аракеттенүү мүмкүчүлүгү жаңы типтеги микроГЭСтин ишин компьютердик моделдөө үчүн колдонулду.

МикроГЭСтин математикалык моделин чагылдырган дифференциалдык теңдемелер системасы 4-тартиптеги Рунге-Куттун сандык ыкмасы менен чыгарылды.

Моделдөөнүн жыйынтыгы сунушталган ыкманын гидротурбинанын айлануусун турукташтырууда жана ошондой эле микроГЭС иштеп чыгарган электр энергиясынын

чыналуусун туруктуулукта кармоодо жогорку натыйжалуулукту көрсөттү.

*Негизги сөздөр:* микроГЭС, маховик, моделдөө, айлануу жыштыгынын турукташуусу, гидротурбина, LABVIEW, MATLAB, Уатт регулятору.

**БЕРИЛГЕН ЖҮК ЖАНА АЗЫКТАНУУ БУЛАГЫНЫН ЧЫҢАЛУУСУ УЧУРУНДАГЫ АР БАШКА НОМИНАЛДЫК ЧЫҢАЛУУСУ БАР ЖАЙЫЛГАН ТАРМАКТАРДАГЫ ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫНЫН РЕЖИМДЕРИН ЖАНА ЖОГОТУУЛАРЫН ЭСЕПТӨӨГӨ КАРАТА ТҮЗҮМДӨШТҮРҮЛГӨН – ИЕРАРХИЯЛЫК КӨП ДЕНГЭЭЛДҮҮ ЫКМА / С.М.Асанова, Арфан аль Хакам, Аскарбек улуу Нурлан, Э.Т.Актаев**

Берилген жүк жана азыктануу булагынын чыңалуусу учурундагы ар башка номиналдык чыңалуусу бар жайылган тармактардагы электр энергиясынын режимдерин жана жоготууларын эсептөөгө карата түзүмдөштүрүлгөн-иерархиялык көп денгээлдүү ыкма сунушталды. Бул ыкма тубаса тармактарды  $U_{ном} \leq 35 \text{кВ}$  жана  $U_{ном} \geq 35 \text{кВ}$  номиналдык чыңалуудагы эки тепкичке бөлүнгөн жана эсеп аныкталган ирээт менен тармактын түзүмү менен өйдөдөн ылдый (1-кадам) жана ылдыдан өйдө (2-кадам) жүгүргөн салттуу (колдонмо) инженердик эки этаптык усул иерархиялык көп денгээлдүү түзүм катары сунуштоого негизделген.

*Негизги сөздөр:* электр бөлүштүрүүчү тармактар; электр жоготуулар; трансформатор; түзүмдөштүрүлгөн- иерархиялык көп денгээлдүү ыкма; багытталган диаграмма; алгоритм.

**КҮЧ ТРАНСФОРМАТОРЛОРДУН ВИТОКТОР АРАЛЫК ЗАМЫКАНИЯСЫН ОБМОТКАНЫН ҮСТҮНКҮ КАТМАРЫНДАГЫ МАЙДЫН ТЕМПЕРАТУРСЫ АРКЫЛУУ ДИАГНОСТИКА ЖҮРГҮЗҮҮ / У.А. Калматов, К.А.Сатаркулов**

Статьяда күч май трансформаторлорундагы витоктор аралык замыканияны диагностика жүргүзүү ыкмалары каралат. Жылуулук контролдоонун сунушталган методунун негизинде локалдык участкалардын температурасынын ушул участкага болгон ар кандай түрдөгү кемчиликтерден көз карандылыгы турат. Үстүнү карай камтылган трансформатор майынын мааниси качан көтөрүлгөн май ага жеткенде, обмотканын үстүндө жайгашкан термодатчик аркылуу катталат.

*Негизги сөздөр:* трансформатор, жылуулук процесси, муздатуу, физикалык моделдер, диагностикалоо, трансформатор майы.

**КУБАТТУУЛУКТУН ЖОГОТУУЛАРЫН ЭСЕПТӨӨ ҮЧҮН АБА ЧУБАЛГЫЛАРДЫН СИНУСТУК ЭМЕС РЕЖИМДЕРИН МОДЕЛДЕШТИРҮ / А.Р. Айдарова, Э.Б. Исакеева, Ж.К. Абдыбаева, Ч.М. Бузурманкулова**

Аба чубалгылардагы жоготуулардын кубаттуулукту толуктоого стохастикалык процесстерди таасирдигин изилдөө үчүн багытталган LABVIEW программанын топтомун колдонуу менен иштеп чыгарылган виртуалдык алеттин (прибордун) мүмкүнчүлүктөрү кеңейтилген. Бул статьяда виртуалдык алет чыңалуу жана агындын синустук эместигинен келип чыккан аба чубалгы зымындагы үстүртөн эффекттердин кошумча жоготууларын эсептөө мүмкүнчүлүгү көрсөтүлгөн.

*Негизги сөздөр:* чыңалуунун жана агындын синустуулугу, үстүртөн эффект, зым, аба чубалгы, виртуалдык алет, LABVIEW

### **МИКРОГЭСТИН ИШИ РЕЖИМИНИН МАСЕЛЕЛЕРИН МОДЕЛДЕШТИРҮҮ ЖАНА АНЫ ИШКЕ АШЫРУУ ҮЧҮН ПРИКЛАДДЫК ПРОГРАММАЛАРДЫН НЕГИЗДЕМЕСИ / А.М. Яблочников**

Бул статьяда микроГЭСтин ишин моделдөөнүн колдонулуп жаткан инструменттеринин салыштырмалуу талдоосу, алардын ыргактуу (өтмө) режимдерин изилдөөнүн өзгөчөлүктөрүн эске алуу менен келтирилген.

Белгиленгендей, Simulink, LabViewти киргизсе болот карата акыркы программалык продуктыларды камтыган бардык зарыл компоненттерди аныктоого мүмкүндүк берүүчү адистештирилген программалык продуктылар жана компьютер менен эсепөөгө байланышкан.

**Негизги сөздөр:** моделдөө; микроГЭС; Simulink; LabView; UML (universal modeling language); булак; блок; белги; осциллограф; талдоо жүргүзүү; синтез; метод.

### **ЭЛЕКТР ЖААСЫНЫН СПИРАЛЬ ТҮРҮНДӨГҮ ЧӨЛМӨКТӨРҮНҮН ШУНТИРЛӨӨСҮН ЭСПЕТӨӨ ЭКСПЕРИМЕНТИ / И.Р. Урсова**

Тышкы аксиалдык магниттик талаадагы туруктуу токтуун ачык электр жаасын сандык моделдөө атарылды. Спираль түрүндөгү ачык электр жаасынын келбети убакыттын өтүшү менен туруктуу эместиги жана мезгил-мезгили менен анын бузулгандыгы табылган. Спираль түрүндөгү чөлмөктөрүнүн арасын шунтирлөөнүн натыйжасында электр жаасынын үзгүлтүксүз түзүмүнүн жаңы бузулуу тартиби аныктаган.

**Негизги сөздөр:** электр жаасы; спираль түрүндөгү электр жаасы; тышкы аксиалдык магниттик талаа; төмөнкү температурадагы плазма.

### **ЖЕТЕКТЕЛГЕН ПРОЦЕССИН МОДЕЛИНДЕГИ ИНТЕГРАЛДЫК – ДИФФЕРЕНЦИАЛДЫК ТЕНДЕМЕ / Т.П. Самохвалова, А.К. Керимбеков, О.К. Таирова**

Аракеттен кийинки топтолгон параметрлүү жөнөкөй система үчүн жакындатылган оптималдык синтездөө алгоритми түзүлдү. Процессстин модели катары V. Volterra тибиндеги интегралдык-дифференциалдык тендеме алынды. Алгоритмдер Р. Беллмандын динамикалык программалоо ыкмасына негизделген.

Ачкыч сөздөр: оптималдык башкаруу, кайра артка байланыш, динамикалык программалоо, интегралдык-дифференциалдык тендеме.

### **БАЙЕСТИН ТҮЙҮНДӨРҮНҮН НЕГИЗИНДЕ ДИСТАНТТЫК ОКУТУУНУ МОДЕЛДЕШТИРҮҮ / А.Дж. Сатыбаев Н.К. Кадыркулова**

Бул макалада билим берүү объекттеринин логикалык структурасын моделдештирүү жана алардын системаларынын процесстерин өз ара байланышуу динамикасы каралаган. Аралыктан билим берүү системасынын активдүү өнүгүп жаткандыгына карабастан, изилдөөчүлөр тарабынан дагы да болсо, бул маселе маанилүү бойдон калууда. Сунушталып жаткан модель билим берүүнү башкаруучу системаларды иштеп чыгууда жана долборлоодо жаралуучу колодонмо маселелердин бардык багыттары үчүн колдонулат. Башкаруу теориясына негизделген билим берүүнүн жаңы багытын математикалык моделдөө маселеси актуалдуу болуп эсептелет.

Ачкыч сөздөр: Маалыматтык технология; математикалык модель; аралыктан окутуу; байестин түйүнү; багытталган диаграмма; тестирлоо; сематикалык модель; эксперттик диагностика; сызыктуу дифференциалдык барабарсыздык; өздөштүрүү коэффициенти.

### **SIMGRID КИТЕПКАНАСЫНЫН ЖАРДАМЫ МЕНЕН БУЛУТТУУ ИНФОРМАТИКАЛЫК-ЭСЕПТӨӨ СИСТЕМАЛАРЫН МОДЕЛДӨӨ / В.В.Гайдамако**

Төмөнкү макалада Simgrid китепканасынын бөлүштүрүүчү тутуму жана булуттагы моделдөө жардамы менен жасалган булуттагы маалымат-ченөөчү тутумдун үлгүсүнүн прототиби каралган. Үлгү физикалык жана жасалма билдиргичтерди, координаторлор, булуттагы бекеттер жана сакталуучу сервелерди камтып, сүрөттө платформа файлы аркылуу тармактын топологиясын жана түзүлүш өзгөртүүгө мүмкүнчүлүк берет. Үлгүнүн иштөөсүнөн кийин жеткиликтүү болгон трассировка файлы жасалма жыйынтыктардын ар кайсы убакыттагы элементтердин абалын андоого мүмкүнчүлүк берет.

Ачкыч сөздөр: булуттагы маалымат-ченөөчү тутумдар, булут тутумдарын моделдөө, Simgrid китепканасы, жасалма билдиргич, сездиргичтик желе.

### **МААЛЫМАТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ ЖАНА МААЛЫМАТТАРДЫ ИШТЕП ЧЫГУУ**

#### **XMPP-СЕРВЕРИНИН ЖАРДАМЫ МЕНЕН ГЕТЕРОГЕНДИК МААЛЫМАТ АГЫМДАРЫНЫН ӨЗ АРА АРАКЕТТЕНУУСÜNНҮН ЖАНА АНЫ БАШКАРУУНУН КӨЙГӨЙЛӨРҮ / Ж.Ш.Шаршеналиев, Д.В Янко**

XMPP протоколун пайдалануу аркылуу маалымат системаларын интеграциялоонун варианттары каралган, ошондой эле ар түрдүү максатта пайдаланууга арналган маалымат системалары үчүн мүмкүн болгон даректүү схемалар каралган

**Ачкыч сөздөр:** XMPP протоколу, билдирүүлөрдүн сервери, интеграция, маалымат системасы

### **КӨРҮҮНҮН АЛЫСТЫГЫН КЫСКА МӨӨНӨТТҮҮ БОЛЖОЛДОО ҮЧҮН ТЕРЕҢДЕТИЛГЕН НЕЙРОНДУК ТОРЛОРДУ КОЛДОНУУ / С.Н.Верзунов**

Убакыт катарын болжолдоо үчүн колдонулуучу тереңдетилген нейрондук торлордун ар түрдүү архитектуралары каралды. Тереңдетилген нейрондук торлордун ар түрдүү архитектураларынын жардамы аркылуу алынган Манас аэропортундагы көрүүнүн алыстыгын болжолдоонун жыйынтыктары, болжолдоонун базалык ыкмасы менен алынган жыйынтыктар менен салыштырылды.

Ачкыч сөздөр: көрүүнүн алыстыгын болжолдоо, терең-окутуу, GRU, LSTM, бирөлчөмдүү – түйүндүү тор, полиморфдук вейвлет-тору.

### **КАЙРА ИШТЕТҮҮ АГЫМДЫК МААЛЫМАТТАРДЫН АЛГОРИТМДЕР / А.М.Сычев Н. Б.Толпинская**

Бул кагаз маалыматтарды ойнотуу боюнча кээ бир негизги алгоритмдердин баяндалышын сунуш кылат. Алгоритмдер ар агымы элементтердин санын табуу үчүн (Алгоритм Flageollet Мартин, ар кайсы жактан LogLog алгоритм), ачылыш жыштыгы агымынын элементтери (Мисра-Grice алгоритм), басымдуу агымы элементин издөө (Бойер Алгоритм - Moore), текшерүү куралдар алдын ала элемент агым (Bloom чыпкасы) издөө агым медианасы (Munro-Paterson алгоритм). Көңүл агымдык Алгоритмдер артыкчылыктары жана кемчиликтери берилет. Алардын негизги мүнөздөмөлөрү. негизги көйгөйлөр, бул алгоритмдер жардамы менен чечүү керек. Көпчүлүк алгоритмдер деталдык сүрөттөлүшүнө ээ. кээ бир алгоритм менен бир кыйла толук жана так түшүнүү үчүн толугу менен (алгоритмдик тили) болуп саналат.

Ачкыч сөздөр агым кайра иштетүү; агым алгоритмдери; чоң дан колдобойм; элемент агып; тактык; иштетүү убактысы.

**ЖОГОРКУ ЖҮКТӨЛГӨН СИСТЕМАЛАРДЫН ӨНДҮРҮМДҮҮЛҮГҮН  
ЖОГОРУЛАТУУ ЫКМАЛАРЫ БОЮНЧА ДЕГЕН СУРООГО / Д.О. Авельцов,  
В.В. Гайдамако**

Статьяда негизги принциптердеги бара -бара түздүк масштабындагы жалпы көрүнүш жүргүзүлгөн. Маалыматтар базасы серверинин бөлүштүрүүсү боюнча суроолор каралган, кэштөө серверин жана кезек серверин түзүү, файлдык сактоолордун өзүнчө физикалык серверлерге жайгаштыруу, WEB серверлерин ФРОНТЕНД жана БЕКЕНД серверлерине бөлүү. Ошондой эле, ФРОНТЕНД серверинин жана DNS серверинин колдонуусу менен жүктөрдү тенсалмактоо суроолор каралган.

**Ачкыч сөздөр:** highland, жогорку жүктөлгөн системалар, жүктөрдү тенсалмактоо, масштабтоо, түздүк масштабтоо.

**БИР КЛАССТАГЫ ТОЛКУН ТЕНДЕМЕЛЕРИНИН ЖАЛПЫЛАНГАН ЧЫГА-  
РЫЛЫШЫ / Ж.Н. Кутунаев, А.Р. Такеева**

Математикалык физиканын көптөгөн маселелери жекече туундулуу дифференциалдык теңдемелерге алып келет. Бул иште атайын гиперболикалык теңдеменин чыгарылгычтыгы изилденет. Берилген моделдик маселелердин чыгарылышын алуу максатында  $\lambda$  параметринин төрт учуру каралды, Фурьенин интегралы менен тригонометриялык катарлар колдонулду.

**Ачкыч сөздөр:** аралаш маселе; гиперболикалык түрдөгү теңдеме; кылкалар; Фурьенин интегралы; тригонометриялык катарлар; чектүү шарт; дифференциалдык теңдемелер; жуп жана так функциялар.

**БИШКЕК ШААРЫНЫН АТМОСФЕРА АБАСЫНДАГЫ PM2.5 ТОПТОЛУУСУ-  
НУН ӨЗГӨРҮҮ ДИНАМИКАСЫНЫН ТАЛДООСУ ЖАНА ARIMA-МОДЕЛИ /  
С.Н.Верзунов, Н.М.Лыченко**

Бишкек шаарынын абасында PM2.5 топтолуусу боюнча байкоо маалыматтарга талдоо берилген. Шаардагы жылытуу мезгилинин аякташы менен аныкталган маалыматтарда эки мезгил аныкталган. Убакыт катарынын мезгилдеринин байкоолорунун трендик, сезондук жана башаламандык бөлүктөргө декомпозициясы жүргүзүлдү. PM2 топтолуусунун өзгөрүүсүнүн суткалык жана 12 сааттык мезгилдүүлүгүн белгилөөгө мүмкүндүк берген баштапкы маалыматтарга спектралдык талдоо жүргүзүлдү, Алгачкы убакыт катарынын ар бир мезгилине PM2.5 топтолуусунун өзгөрүү динамикасынын ARIMA-модели сунуш кылынды.

**Негизги сөздөр:** ARIMA-модель, туруктуу эмес убакыт катарынын декомпозициясы, PM2.5 топтолуусу.

## ABSTRAKT

### CONTROL AND ORGANIZATION OF DYNAMIC SYSTEMS AND NETWORKS

#### **A UTILITY NETWORKS OPTIMIZATION PROBLEMS FOR VARIOUS PURPOSE** */ G.Yh.Toktoshov*

The engineering communications networks optimization problem of various purposes the conditions of urban development. A new technique for simulating engineering communications networks, allowing to take into account, the hierarchy of the structure of the projected network, and compatibility of the projected network with other networks for various purposes proposed. A two-stage algorithm for finding the optimal solution by the criteria of cost and compatibility of the projected types of networks. Approximate algorithm proposed in this work allows us to construct the cheapest network object.

Keywords: optimal control; stabilization; method of R.Bellman, power transformer, compulsory system of cooling.

#### **ALGORITHM OF STABILIZATION OF TEMPERATURE MODES OF THE POWER TRANSFORMER** / *T.P. Samokhvalova, N.T. Niyazov, U.A. Saktanov, T.K.Satarkulov*

Algorithms of control and stabilisation for lamped parametres system are constructed. Object of control is the power transformer with compulsory system of cooling. Algorithms are based on a method of dynamic programming of R.Bellman.

Keywords: optimal control; feedback; dynamic programming; the integro-differential equation.

#### **COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS OF SPEED CONTROL OF HYDRO TURBINES MICRO HYDRO AND THEIR COMPARATIVE CHARACTERISTICS** / *A. M. Yablochnikov*

Currently, there is a global trend of transition to non-traditional renewable energy sources. It is noted that the implementation of such a concept is impossible to imagine without new technical and scientific ideas. The necessary studies for the development of simple technical solutions in the design of hydraulic units for the automation of the stabilization of the frequency of rotation and, accordingly, the development of their mathematical (computer) models.

Keywords: micro hydroelectric power plant, hydro turbine, frequency, control method, rotation speed, stabilization

## MODELING AND DIAGNOSIS OF DYNAMIC SYSTEMS AND OBJECTS

### APPLICATION OF MATLAB AND LABVIEW ENVIRONMENT FOR DEMONSTRATION DYNAMIC BEHAVIOR OF NEW TYPE HYDRO – AGGREGATE / *A.B. Bakasova, G.N. Niiazova, T.K. Satarkulov, Ch.M. Buzurmankulova, Ch. K.Duisheeva*

For computer modeling of new type of micro hydroelectric station is used interoperability of LabVIEW and MatLAB packages. The system of differential equation representing mathematic model of micro hydroelectric station, which is solved by a numerical method of Runge–Kutta 4th order. Results of modeling showed high efficiency of the proposed method of stabilization of rotation of water turbines, and also stabilization of voltage frequency of electrical energy produced by micro hydroelectric station.

Keywords: micro hydroelectric station, flywheel, modeling, voltage frequency stabilization, water turbine, watt regulator, MatLAB, LabVIEW.

### STRUCTURED HIERARCHICALLY-LAYERED APPROACH TO THE CALCULATION OF MODES AND POWER LOSS IN OPEN-LOOP NETWORKS WITH DIFFERENT RATED VOLTAGES UNDER GIVEN LOADS AND POWER SUPPLY VOLTAGE / *S.M.Asanova, Arfan Al Hakam, Askarbek uluu Nurla, A.T. Aktaev*

The aim of the method is to design a structured hierarchically-layered approach to the calculation of modes and power loss in open-loop networks with different rated voltages under given loads and power supply voltage. This approach is based on representation of the original graph network as a hierarchically-layered structure, divided into two stages with rated voltages  $U_{ном} \leq 35$  kW and  $U_{ном} > 35$  kW, and on using the traditional (manual) engineering two-stages method, in which the calculate is made with specific sequence, going through the network structure «from down to up» (1 stage) and «from up to down» (2 stage).

Keywords: distributive electric networks; electric power losses; transformer; hierarchically structured-tiered approach; directed graph; algorithm.

### DIAGNOSIS OF INTERTURN SHORT CIRCUITS IN POWER TRANSFORMERS THE OIL TEMPERATURE IN THE UPPER LAYERS OVER ITS WINDINGS / *U.A. Kalmatov, K.A. Satarkulov*

The article discusses a method of diagnosis of interturn short circuits (MOH) in oil transformers (CMT). The proposed method of thermal control is based on the dependence of the temperature of the local sections of the SMT winding on the defects of various types that exist in this area. As a result of the increase in the temperature of transformer oil (TM) in this area due to the resulting lift, the heated TM rushes up from the damaged local winding section. The temperature value of the upward directed oil can be registered by a temperature sensor located above the winding when the rising oil reaches it.

Keywords: Power oil transformers, thermal process, cooling, transformer oil, diagnostics, magnetic circuit.

**MODELING NONUSINUSOIDAL OVERHEAD LINE MODES FOR POWER LOSS CALCULATION / A. R. Aydarova, E. B. Isakeeva, Zh. K. Abdybaeva, Ch. M.**

*Buzurmankulova*

The capabilities of the virtual instrument developed using the LABVIEW software package, which is designed to study the effect of stochastic processes on additional power loss in overhead lines, have been expanded. In this article, a virtual device allows taking into account the skin effect in the overhead electrical line arising from the non-sinusoidality of voltage and current during the calculation of the additional power loss.

Keywords: non-sinusoidal voltage and current, the skin effect, wire, overhead line, virtual instrument, LABVIEW.

**THE ISSUES OF MODELING OF OPERATION MODES OF MICRO HYDRO AND JUSTIFICATION OF APPLICATION PROGRAMS / A.M.Yablochnikov**

The article presents a comparative analysis of the existing modeling tools of micro hydropower, taking into account the features of the study of dynamic (transient) modes of their abota. It is noted that Simulink, LabView can be attributed to the latest software products that contain all the necessary components that allow you to insert and debug specialized software products and interface with computers.

Keywords: modeling; micro hydro; Simulink; LabView; UML (universal modeling language); source; unit; signal; oscilloscope; analysis; synthesis; method.

**NUMERICAL EXPERIMENT OF SHUNTING THE WHEELS OF THE SPIRAL OF A SCREW-SHAPED ELECTRIC ARC / I.R. Urusova.**

A numerical simulation of an open electric arc in an external uniform axial magnetic field has been performed. It has been established that the screw shape of the open arc is not constant in time and periodically collapses. A new mode of destruction of the regular structure was revealed as a result of shunting the arc section between the turns of the spiral.

Keywords: electric arc; screw form of electric arc; external axial magnetic field; low temperature plasma.

**THE INTEGRATED-DIFFERENTIAL EQUATION IN MODEL OF CONTROLLED PROCESS / T.P. Samokhvalova, A.K. Kerimbekov, O.K. Tairova**

The algorithm of approximately-optimal synthesising control for linear system with the lamped parametres system with delay is constructed. Process model is the integro-differential equation V. Volterra. The algorithm is based on a method of dynamic programming of R. Bellman.

Keywords: optimal control; feedback; dynamic programming; the integro-differential equation.

**MODELLING OF DISTANCE LEARNING BASED ON BAYESIAN NETWORK /  
*Satybayev A.Dj., Kadyrkulova N.K.***

The article deals with the tasks associated with modeling the logical structure of educational objects and the dynamics of their interaction. Despite the active development of distance learning systems, these tasks remain important for all developers. The proposed mathematical models are applicable for a wide range of applied problems arising in the design and development of learning management systems. The problem of modeling a new form of learning based on control theory is relevant.

Keywords: Information technologies; mathematical model; distance learning; the Bayesian network; oriented graph; testing; semantic model; expert diagnostics; linear differential equation; absorption coefficient.

**SIMULATION OF THE CLOUD INFORMATION-MEASUREMENT SYSTEM  
USING SIMGRID LIBRARY / *V.V.Gaidamako***

In this paper, a prototype of the cloud information-measuring system (Sensor-Cloud system) model created using the Simgrid cloud and distributed systems modeling library is considered. The model includes physical and virtual sensors, coordinators, cloud stations and storage servers; it allows the composition and network topology changing with the platform description file. The trace file available after model completion allows analyzing the state of the elements at any time with results visualization.

Keywords: cloud information-measuring systems, cloud systems simulation, Simgrid library, virtual sensors, sensor networks

**INFORMATION TECHNOLOGIES AND INFORMATION PROCESSING**

**PROBLEMS OF INTERACTION AND MANAGEMENT OF HETEROGENEOUS  
INFORMATION FLOWS BY MEANS OF A XMPP SERVER / *Sharshentaliev Z.Sh,  
Yanko D.V.***

The article discusses options for integrating information systems using the XMPP protocol, and also discusses possible addressing schemes for information systems of various purposes.

Keywords: XMPP protocol, message server, integration, information system

**ANALYSIS AND ARIMA MODELS OF THE PM2.5 POLLUTION DYNAMICS IN  
ATMOSPHERIC AIR OF BISHKEK / *S.N. Verzunov, N.M Lychenko***

An analysis of monitoring of the PM2.5 pollution in the air of Bishkek has been presented. Two periods are identified in the data, determined by the end of the heating season in the city. The decomposition of periods of the time series into trend, seasonal and chaotic components was made. A spectral analysis of the source time series was carried out, which allowed us to establish the daily and 12-hour periodicity in changes in concentrations. ARIMA models of the PM2.5 pollution dynamics for each of the periods of the source time series are proposed. Keywords: ARIMA model, decomposition of non-stationary time series, PM2.5 concentration.

**ALGORITHMS FOR STREAMING DATA / A.M.Sychev N.B.Tolpinsky**

This paper provides a brief overview of some basic stream processing algorithms. Algorithms for finding the number of different flow elements (Flageole-Martin algorithm, different variants of the LogLog algorithm), finding frequencies of flow elements (Misra-Grice algorithm), searching for the predominant flow element (Boyer-Moore algorithm), checking the membership of a given element for a flow (Bloom filter), search for flow medians (Munro-Paterson algorithm). Attention is paid to the advantages and disadvantages of streaming algorithms. Their main characteristics are given. The main tasks are solved using these algorithms. Most algorithms contain a detailed description. For a more complete and accurate understanding, some algorithms are given in full (in an algorithmic language).

Keywords: stream processing; streaming algorithms; big data; flow item; accuracy; time of processing.

**TO THE QUESTION OF THE PERFORMANCE INCREASING METHODS OF HIGHLY LOADED SYSTEMS / V.V.Gaidamako, D.O. Aveltsov**

The paper discusses the basic principles of staged scaling of high-loaded systems. The issues of allocating a database server, creating a caching server and a queue server, placing file storage on separate physical servers, dividing web servers into frontend and backend servers are considered. Also considered issues of load balancing using front-end server and DNS server.

Keywords: high-load, high-load systems, load balancing, scaling, horizontal scaling.

**GENERALIZED SOLUTIONS OF TASKS FOR RUNNERS WAVE EQUATION SOLUTIONS' ONE CLASS / Zh.N. Kutunayev., A.R. Takeeva**

Many problems of mathematical physics lead to partial differential equations. In this paper, we study the solvability of a special hyperbolic equation. Four cases of the parameter  $\lambda$  were considered for obtaining a solution to a given model problem (1) – (3), and also trigonometric series and the Fourier integral were used.

Keywords: mixed task, hyperbolic type equations, strings, Fourier integral, trigonometric series, boundary conditions, differential equations, odd and even functions.

**ANALYSIS AND ARIMA MODELS OF THE PM2.5 POLLUTION DYNAMICS IN ATMOSPHERIC AIR OF BISHKEK / S.N. Verzunov, N.M. Lychenko**

An analysis of monitoring of the PM2.5 pollution in the air of Bishkek has been presented. Two periods are identified in the data, determined by the end of the heating season in the city. The decomposition of periods of the time series into trend, seasonal and chaotic components was made. A spectral analysis of the source time series was carried out, which allowed us to establish the daily and 12-hour periodicity in changes in concentrations. ARIMA models of the PM2.5 pollution dynamics for each of the periods of the source time series are proposed.

Keywords: ARIMA model, decomposition of non-stationary time series, PM2.5 concentration.

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

Научно-технический журнал

Редактор Л.В.Тарасова  
Компьютерная верстка В.П. Алексеева

Подписано к печати 19.05.2019 г. Формат 70/108 1/8  
Печать офсетная. Объем 18,26 п.л. Тираж 200 экз.

Издательство «Илим»  
720071, Бишкек, проспект Чуй, 265-а