

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 № 2 (37)

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 автоматизации и управления: Научно-технический журнал  
/ Национальная академия наук Кыргызской Республики.–  
Бишкек: Илим, 2019.– №2 (37).– 186 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 информационным технологиям и обработке информации, математическому и компьютерному моделированию динамических систем и процессов, автоматическому управлению динамическими системами и процессами

Контакты редакции:

720071, Бишкек, проспект Чуй, 265.

Институт автоматизации 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

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

<i>Лыченко Н.М.</i> Регрессионный анализ метеорологических факторов и концентраций частиц PM2.5 в атмосферном воздухе г.Бишкек5.....	5
<i>Великанова Л.И., Лыченко Н.М.</i> Мультирегрессионные и обобщенно-регрессионные нейросетевые модели краткосрочного прогноза загрязнения рм2.5 в г. Бишкек с учетом метеорологических параметров .....	16
<i>Гайдамако В.</i> Обзор методов мониторинга и оценки производительности компонент облачной информационно-измерительной системы.....	26
<i>Авельцов Д.</i> Разработка программных элементов виртуальных датчиков с помощью контейнеров.....	39
<i>Шаршеналиев Ж.Ш., Мирзакулова Ш.А., Исакова С.У.</i> Прогнозирование сетевого трафика.....	51
<i>Кожогулова А.К.</i> Разработка мобильной интеллектуальной системы мониторинга состояния усталости водителей.....	57
<i>Кожогулова А.К.</i> Тестирование мобильного приложения для оценки состояния усталости водителей.....	64
<i>Акишев К.М., Арынгазин К.Ш., Карпов В.И.</i> Применение методов кластерного анализа для статистической оценки качества металлургического шлака павлодарского филиала ТОО «КАСТИНГ» .....	79

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

<i>Шаршеналиев Ж.Ш., Самохвалова Т.П.</i> Приближенное решение уравнения Беллмана в задачах оптимального управления технологическими процессами нагрева.....	88
<i>Кутунаев Ж.Н.</i> Функционально-дифференциальное уравнение в модели колебательного процесса.....	93
<i>Сатыбаев А.Дж., Курманалиева Г.С.</i> Численный метод решения двумерной прямой задачи распространения потенциала действий по нервному волокну.....	99
<i>Бакасова А.Б., Сатаркулов Т.К., Ниязова Г.Н.</i> Определение параметров микроГЭС нового типа по результатам компьютерного моделирования.....	110

**Бузурманкулова Ч.М., Кадиева А.К., Исакеева Э.Б., Узагалиев З.А., Дюшеева Ч.К., Абдыбаева Ж.К.** Оценка влияния качества электроэнергии на потери мощности в элементах электрической сети на основе компьютерного моделирования.....117

**Пресняков К.А., Керимкулова Г.К., Аскалиева Г.О., Першакова Е.Ю.** Метод определения «расстояния независимости» кинематических характеристик потока воды друг от друга, измеряемых в двух соседних измерительных точках.....126

#### **АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ И ПРОЦЕССАМИ**

**Шаршеналиев Ж.Ш., Бакасова А.Б.** О новом подходе к использованию энергетических инвариаторов в теории управления нелинейными колебаниями.....131

**Айдарова А.Р.** Модельное представление потерь от короны в высоковольтных воздушных линиях электропередачи в условиях высокогорья.....140

**Ниязов Н.Т., Ниязова Г.Н.** Контроль и диагностика энергообъектов сложной электроэнергетической системы: состояние и проблемы.....147

**Асанова С.М., Арфан аль Хакам, Жабудаев Т.Ж., Сатаркулов Т.К., Тиленбаев И.Н., Усубалиева Г.К.** Обобщенная схема методики проектирования автономных распределенных энергокомплексов и управление энергетическим балансом в них.....155

**Бочкарев И.В., Садыков Д.Н., Мусабеков Б.К.** Разработка методики расчета поляризованных магнитных механизмов для систем автоматизации.....165

**Аннотации**.....176

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

---

УДК 004.89

10.5281/zenodo.3594649

**Н.М.Лыченко**

*Институт машиноведения и автоматизации НАН КР, Бишкек, Кыргызстан.*

*E-mail: [nlychenko@mail.ru](mailto:nlychenko@mail.ru)*

### РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И КОНЦЕНТРАЦИЙ ЧАСТИЦ PM<sub>2.5</sub> В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ Г.БИШКЕК

В работе представлены результаты регрессионного анализа концентраций загрязнения воздуха частицами PM<sub>2.5</sub> и метеорологических данных, таких как скорость ветра, температура, относительная влажность воздуха, температура точки росы, интенсивность осадков и атмосферное давление для города Бишкек в период с 9 февраля по 25 ноября 2019г. Исследование проведено с целью выявления влияния метеопараметров на значения концентраций PM<sub>2.5</sub> и дальнейшего использования этой информации для построения моделей прогноза.

**Ключевые слова:** корреляции, регрессионный анализ, метеорологические параметры, концентрации PM<sub>2.5</sub>.

**Введение.** Уровень концентрации загрязнения атмосферного воздуха коррелирует с различными метеорологическими факторами и их сочетаниями [1–6]. Имея наборы данных о концентрации загрязнения воздуха и метеорологические данные, можно рассчитать статистические зависимости между переменными, используя, например, методы регрессионного анализа. Можно установить, насколько связаны значения концентраций загрязняющих веществ и метеоданные, фактически измеренные в аналогичных обстоятельствах. В литературе представлены некоторые исследования, в которых исследуется корреляция загрязнения воздуха и метеопараметров. Корреляция загрязнения SO<sub>2</sub> и PM в городе Элязыг в зимний, осенний и весенний периоды с такими метеорологическими параметрами, как скорость ветра, температура, атмосферное давление, солнечная радиация и относительная влажность, была исследована в [2]. В [3] проведен корреляционный анализ AQI и таких метеопараметров, как максимальная суточная скорость ветра и суточная термическая экскурсия. Корреляции загрязнения SO<sub>2</sub> и PM в городе Эрзурум (Турция) с такими метеорологическими параметрами, как скорость ветра, температура, атмосферное давление, осадки и относительная влажность, были исследованы в [4]. В [5] изучено влияние метеорологических параметров на индекс качества воздуха в Исфахане. Простые регрессии построены в [6] для иллюстрации влияния метеорологических факторов на уровень AQI в различных городских районах восточной Индии. Как отмечено в [7], дальнейшее развитие исследования процессов загрязнения атмосферного воздуха в г.Бишкек связано с учетом метеорологических факторов, влияющих на загрязнение воздуха в городе. Это позволит одновременно учитывать большое количество влияющих параметров, и

наиболее полно отразит характерные для исследуемой системы причинно-следственные связи между параметрами.

В настоящей работе представлены результаты регрессионного анализа концентраций загрязнения воздуха частицами PM2.5 и метеорологических данных, таких как скорость ветра, температура, относительная влажность воздуха, температура точки росы, интенсивность осадков и атмосферное давление для города Бишкек в период с 9 февраля по 25 ноября 2019 г. Исследование проведено с целью выявления влияния метеопараметров на значения концентраций PM2.5 и дальнейшего использования этой информации для построения моделей прогноза с целью предупреждения неблагоприятной экологической ситуации.

**Методы и модели.** Регрессионный анализ [8] используется для нахождения взаимосвязи между независимыми переменными  $x_t$  и зависимыми переменными  $y_t$ , представленными выборками наблюдений, и получения наилучшего из доступных уравнений для выбранной модели аппроксимации:  $y_{ft} = f(x_t)$  ( $y_{ft}$  – рассчитанное по модели значение независимой переменной в срок  $t$ ). Если число независимых переменных  $x$  больше одного, используется анализ множественной регрессии.

Для установления корреляций между зависимой и независимыми переменными анализируются по отдельности модели:

$$y_{ft} = k_1x_{1t} + b_1, \quad y_{ft} = k_2x_{2t} + b_2, \quad y_{ft} = k_mx_{mt} + b_m \quad \dots$$

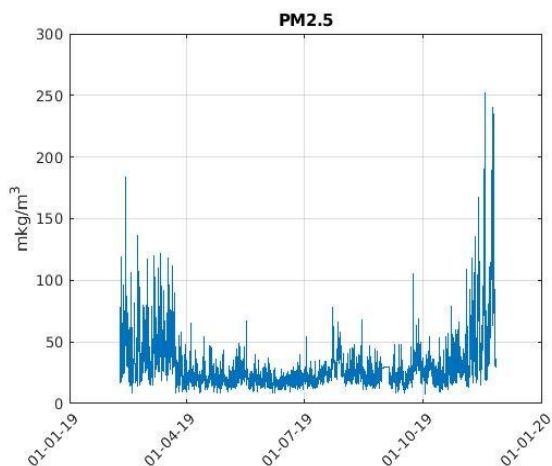
где  $a$  – константа регрессии,  $b_m$  – коэффициенты регрессии,  $m$  – количество независимых переменных (факторов, предикатов). Значения константы и коэффициентов определяются с использованием метода наименьших квадратов, который минимизирует ошибку  $e_t = (y_t - y_{ft})$  или остатки модели. Для определения показателя качества соответствия линейной модели обычно используется коэффициент детерминации  $R^2$  или – для данного случая – коэффициент корреляции  $R$ :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (y_t - y_{ft})^2}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2}.$$

В настоящем исследовании концентрации PM2.5 рассматривались как зависимые переменные. Метеопараметры: температура воздуха, температура точки росы, влажность воздуха, скорость ветра, давление, интенсивность осадков рассматривались как независимые переменные.

**Данные и вычислительные эксперименты.** В работе использованы данные о содержании PM2.5 в атмосферном воздухе г. Бишкек, размещенные на сайте [9]. Данные содержатся в CSV – формате и включают данные о концентрации PM2.5 ( $\text{mkg/m}^3$ ), начиная с 06.02.19 по настоящее время (период измерения – 1 час). На рисунке 1 представлено изменение содержания PM2.5 в атмосферном воздухе г. Бишкек за период с 09.02.2019 по 25.11.2019 с интервалом в 3 часа<sup>1</sup>. При этом с 30.08.2019 по 04.09.2019 измерения отсутствуют.

<sup>1</sup> Данные для исследования подготовлены Л.А. Комбаровою.



Период наблюдений	PM2.5	
	mean, mkg/m <sup>3</sup>	$\sigma$ , mkg/m <sup>3</sup>
09.02.2019-25.11.2019	29.6322	21.9179
09.02.2019-23.03.2019	43.9942	23.8089
24.03.2019-31.10.2019	22.2688	10.4384
01.11.2019-25.11.2019	62.4100	44.3531

Рисунок 1 – Значения концентраций PM2.5 в воздухе г. Бишкек за период 09.02.2019-25.11.2019 и их статистические характеристики в различные периоды наблюдений.

На графиках отчетливо отмечаются два скачка в значениях PM2.5 и AQI: 23 марта 2019 г. значения резко падают и 1 ноября 2019 г. значения резко возрастают. Указанные даты – конец и начало отопительного сезона в городе. Также на рисунке 1 представлены среднее (математическое ожидание) *mean* и стандартное (средне-квадратическое) отклонение  $\sigma$  за весь период наблюдений, а также за периоды 09.02.2019–23.03.2019, 24.03.2019–31.10.2019, 1.11.2019–25.11.2019. Такое разбиение на периоды определено исходя из графика работы ТЭЦ г. Бишкек как, одного из основных источников загрязнений воздуха в городе. Учитывая, что октябрь месяц в 2019 году был относительно теплым (средняя температура воздуха – 12.6 °С), предположено, что отопление частного сектора в этот период не оказывало существенного влияния на показатели загрязнения воздуха.

Для исследования влияния метеорологических факторов (таких, как скорость ветра, температура, относительная влажность воздуха, температура точки росы, осадки и атмосферное давление) на уровень загрязнения атмосферного воздуха использованы данные с сервера международного обмена NOAA (США) в формате SYNOP. На этом сервере хранятся измерения метеопараметров, произведенные более чем 90000 наземными станциями мира, в том числе, метеостанцией Бишкек (WMO\_ID=38353). Данные получены через сайт [10] в виде Excel-файла за период с 09.02.19 по 25.11.19.

Графики изменений метеопараметров за указанный период представлены на рисунке 2. На этом рисунке: Air temperature, T – температура воздуха в градусах Цельсия (°C), Dew point, Td – температура точки росы – температура, при понижении до которой содержащийся в воздухе водяной пар достигнет насыщения в градусах Цельсия (°C), Wind Speed, Ws – скорость ветра в метрах в секунду (м/с), Relative Humidity, RH – относительная влажность воздуха в процентах (%), Atmosphere Pressure, P- атмосферное давление в гектопаскалях (гПа), Precipitation Rate, PR – показатель осадков: 1 – ливень или сильный дождь (снег), 0.75 – дождь (снег) или слабый ливневый дождь, 0.5 – слабый дождь (снег), 0.25 – морось. На всех графиках значения переменных на интервале 30.08.19 – 04.09.19 заменены их средними значениями и в дальнейших расчетах не учитываются, т.к. измерения концентрации PM2.5 в этот период отсутствуют.

**Результаты и обсуждение.** В таблицах 1–6 представлены средние значения и стандартные отклонения метеорологических параметров в различные периоды наблюдений. Для каждого из периодов наблюдений с помощью линейного регрессионного анализа были определены уравнения регрессии между концентрациями PM2.5 и

метеорологическими параметрами (для каждого в отдельности). Также были определены корреляционные коэффициенты  $R$ . Результаты представлены в таблицах 1-6.

В таблице 1 представлена оценка влияния температуры атмосферного воздуха  $T$ , измеренной в срок  $i$  на концентрацию PM2.5, измеренную также в срок  $i$  для различных периодов времени. Также показано влияние инерционного фактора, т.е. влияние температуры атмосферного воздуха  $T$ , измеренной в сроки  $i-1$ ,  $i-2$  (соответственно на 3 часа и 6 часов ранее), на концентрацию PM2.5, измеренную в срок  $i$ .

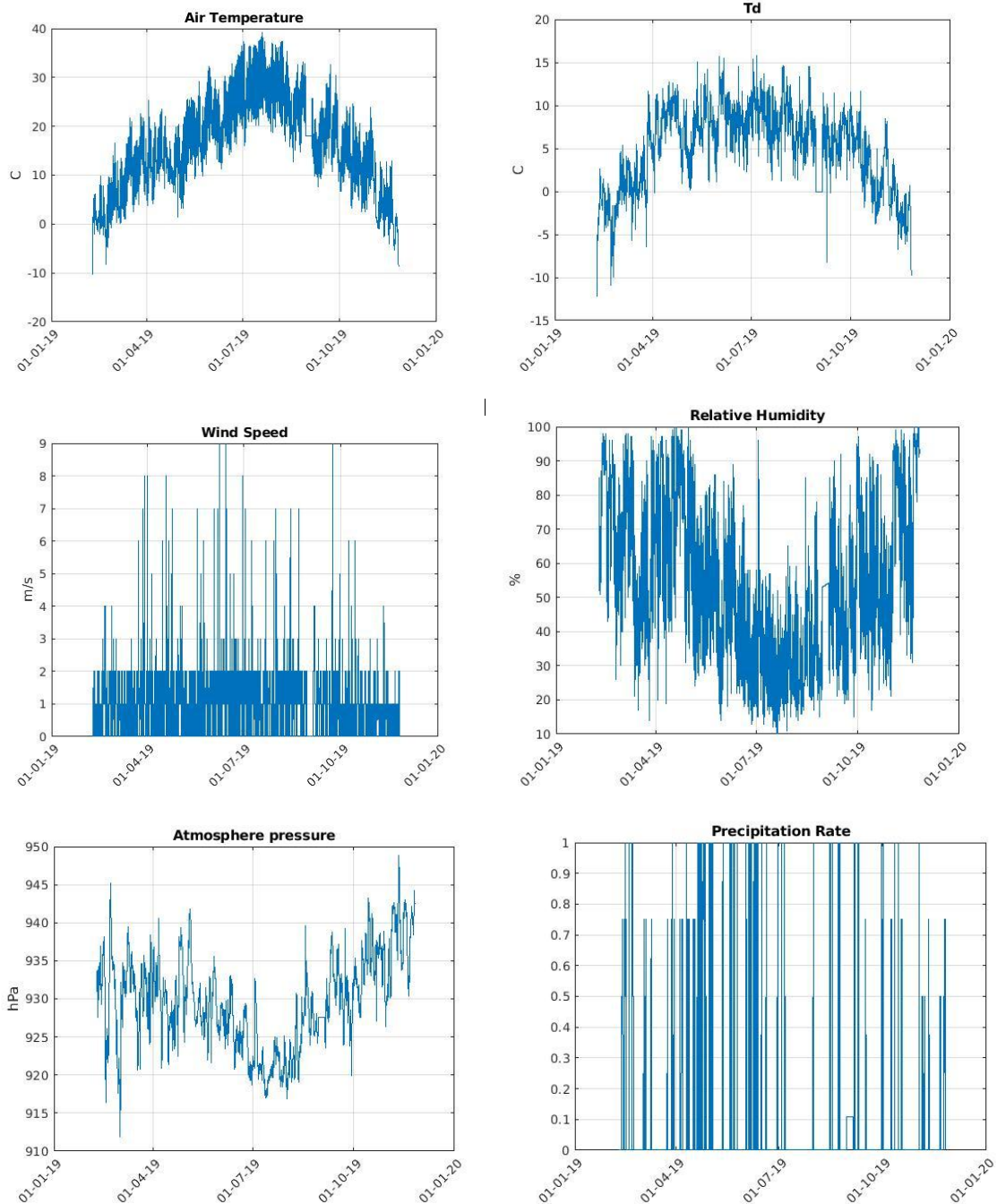


Рисунок 2 – Измеренные значения метеопараметров в г. Бишкек (станция) за период 09.02.19 – 25.11.19



Таблица 1 – Корреляционные коэффициенты и коэффициенты уравнений линейной регрессии  $PM2.5 = k*T+b$

$T$ (Температура)	$k$	$b$	$mean$	$std$	$R$
09/02/2019 -- 25/11/2019					
$i$	-0.7996	42.5278	16.1154	9.8356	-0.3553
$(i-1)$	-0.7166	41.1913	16.1186	9.8376	-0.3183
$(i-2)$	-0.7352	41.4932	16.1154	9.8356	-0.3264
24/03/2019 – 31/10/2019					
$i$	0.1210	20.5967	19.7450	7.8773	0.0966
$i-1$	0.2196	18.6324	19.7450	7.8773	0.1768
$i-2$	0.1948	19.1229	19.7450	7.8773	0.1569
09/02/2019 – 23/03/2019 01/11/2019 – 25/11/2019					
$i$	-0.8268	54.5637	4.5994	5.7113	-0.1390
$i-1$	-0.3977	52.5949	4.5994	5.7113	-0.0668

Из таблицы 1 видно, что в зимний период и за весь период наблюдений концентрации  $PM2.5$  уменьшаются с повышением температуры, что может быть объяснено, в первую очередь, уменьшением расхода топлива на отопление. При этом влияние температуры, измеренной в более ранние сроки ( $i-1$ ,  $i-2$ ) ослабевает. Для летнего периода с повышением температуры концентрация частиц в воздухе незначительно повышается, при этом более существенным оказывается влияние в предыдущие сроки измерений  $i-1$  и  $i-2$ . На рисунке 3 представлены графики изменения  $PM2.5$  в зависимости от температуры воздуха для периодов 09/02/2019 – 25/11/2019 и 24/03/2019 – 31/10/2019.

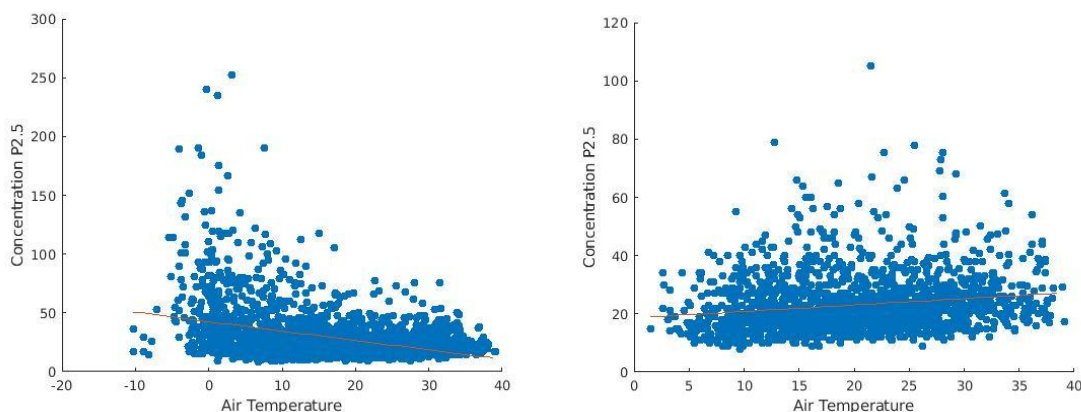


Рисунок 3 – Зависимость концентраций  $PM2.5$  от температуры  $T$ :

- а)  $PM2.5(i) = -0.7996 * T(i) + 42.5278$  для периода 09/02/2019 - 25/11/2019;
- б)  $PM2.5(i) = 0.2196 * T(i-1) + 18.6324$  для периода 24/03/2019 - 31/10/2019

В таблице 2 представлена оценка влияния температуры точки росы  $Td$ , измеренной в срок  $i$ , на концентрацию  $PM2.5$ , измеренную также в срок  $i$  для различных периодов времени: коэффициенты корреляции, соответственно -0.3946, -0.0277, -0.0479. Однако, оказалось, что влияние инерционного фактора в данном случае более выраженное: наибольшее влияние имеет температура точки росы, измеренная в срок  $i-5$  (на 15 часов ранее) – для всего периода наблюдений и в зимний период, для летнего периода этот срок равен  $i-2$  (на 6 часов ранее).

Таблица 2 – Корреляционные коэффициенты и коэффициенты уравнений линейной регрессии  $PM_{2.5} = k \cdot Td + b$ 

<i>Td</i> (Точка росы)	<i>k</i>	<i>b</i>	<i>mean</i>	<i>std</i>	<i>R</i>
09/02/2019 – 25/11/2019					
<i>i</i>	-1.8306	39.1591	5.2019	4.7671	-0.3946
<i>i-1</i>	-1.9671	39.8637	5.2019	4.7671	-0.4247
<i>i-2</i>	-2.1189	40.6468	5.2019	4.7671	-0.4582
<i>i-3</i>	-2.1616	40.8610	5.2019	4.7671	-0.4683
<i>i-4</i>	-2.1627	40.8577	5.2019	4.7671	-0.4696
<i>i-5</i>	-2.2263	41.2034	5.2019	4.7671	-0.4812
<i>i-6</i>	-2.1996	41.0616	5.2019	4.7671	-0.4756
<i>i-7</i>	-2.1482	40.7925	5.2019	4.7671	-0.4647
<i>i-8</i>	-2.0474	40.2671	5.2019	4.7671	-0.4430
24/03/2019 – 31/10/2019					
<i>i</i>	-0.0786	23.5233	7.0804	3.4522	-0.0277
<i>i-1</i>	-0.3463	25.4192	7.0804	3.4522	-0.1220
<i>i-2</i>	-0.5273	26.7018	7.0804	3.4522	-0.1857
<i>i-3</i>	-0.5096	26.5784	7.0804	3.4522	-0.1792
<i>i-4</i>	-0.4223	25.9600	7.0804	3.4522	-0.1484
09/02/2019 – 23/03/2019 01/11/2019 – 25/11/2019					
<i>i</i>	-0.5044	50.3741	-0.7651	3.2001	-0.0479
<i>i-1</i>	-0.8369	50.1120	-0.7651	3.2001	-0.0796
<i>i-2</i>	-1.6218	46.4935	-0.7651	3.2001	-0.1547
<i>i-3</i>	-2.1452	49.0753	-0.7651	3.2001	-0.2048
<i>i-4</i>	-2.4390	48,8314	-0.7651	3.2001	-0.2332
<i>i-5</i>	-2.6016	48.6863	-0.7651	3.2001	-0.2492
<i>i-6</i>	-2.2120	48.9853	-0.7651	3.2001	-0.2122
<i>i-7</i>	-1.8262	49.2863	-0.7651	3.2001	-0.1753
<i>i-8</i>	-1.3470	49.6692	-0.7651	3.2001	-0.1294

На рисунке 4 представлены графики изменения  $PM_{2.5}$  в зависимости от температуры точки росы для всего периода наблюдений 09/02/2019 - 25/11/2019.

Оценка влияния скорости ветра  $W_s$  на загрязнение частицами  $PM_{2.5}$  представлена в таблице 3. Из анализа таблицы следует, что корреляции скорости ветра для зимнего и всего периодов наблюдений – отрицательные, более выраженные в зимний период. Существуют инерционные связи: для зимнего периода наибольший коэффициент корреляции  $R = -0.2453$  соответствует сроку *i-6*, т.е. интервалу времени в 18 часов. Для всего периода наблюдений корреляция слабее:  $R = -0.1019$  для *i-1* (интервал времени 3 часа). Как показывают цифры из таблицы 1.6, в летний период времени наибольший коэффициент корреляции  $R = -0.1280$  соответствует интервалу *i-5* (15 часов), однако для других интервалов  $R$  может принимать несущественные и даже положительные значения.

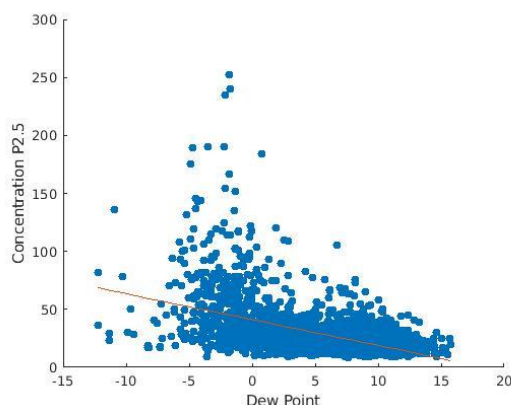


Рисунок 4 – Зависимость концентраций  $PM_{2.5}$  от температуры точки росы  $Td$ :  
 $PM_{2.5}(i) = -2.2263 * Td(i-5) + 41.2034$  для периода 09/02/2019 – 25/11/2019

Таблица 3 – Корреляционные коэффициенты и коэффициенты уравнений линейной регрессии  $PM_{2.5} = k * W_s + b$

WS (Скорость ветра)	$k$	$b$	$mean$	$std$	$R$
09/02/2019 – 25/11/2019					
$i$	-1.5295	31.3837	1.1394	1.0841	-0.0748
$i-1$	-2.0828	32.0134	1.1394	1.0841	-0.1019
$i-2$	-1.8846	31.7885	1.1394	1.0841	-0.0922
24/03/2019 – 31/10/2019					
$i$	0.4657	22.4067	1.2023	1.1489	0.0546
$i-1$	-0.0542	23.0321	1.2023	1.1489	-0.0064
$i-2$	0.2161	22.7069	1.2023	1.1489	0.0253
$i-3$	-0.1861	23.1907	1.2023	1.1489	-0.0218
$i-4$	-0.9947	24.1635	1.2023	1.1489	-0.1166
$i-5$	-1.0922	24.2808	1.2023	1.1489	-0.1280
$i-6$	-0.9962	24.1652	1.2023	1.1489	-0.1168
$i-7$	-0.1526	23.1504	1.2023	1.1489	-0.0179
09/02/2019 – 23/03/2019 01/11/2019 – 25/11/2019					
$i$	-6.3827	56.7720	0.9393	0.8154	-0.1527
$i-2$	-6.5410	56.9209	0.9393	0.8154	-0.1565
$i-3$	-7.1665	57.4965	0.9393	0.8154	-0.1712
$i-4$	-12.5805	55.0870	0.9393	0.8154	-0.2187
$i-5$	-9.3373	59.5528	0.9393	0.8154	-0.2235
$i-6$	-10.2376	60.3813	0.9393	0.8154	-0.2453
$i-7$	-5.0298	55.4894	0.9393	0.8154	-0.1205

На рисунке 5 представлены графики изменения  $PM_{2.5}$  в зависимости от скорости ветра для периодов 09/02/2019 – 23/03/2019 и 24/03/2019 – 31/10/2019.

Оценка влияния относительной влажности  $RH$ , измеренной в сроки  $i, i-1, i-2, i-3$ , на концентрацию  $PM_{2.5}$ , измеренную в срок  $i$ , для различных периодов времени представлена в таблице 4. Для всего периода наблюдений и для зимнего периода это влияние имеет положительные корреляции, при этом инерционность процесса не отмечается. Для летнего периода увеличение относительной влажности приводит к уменьшению загрязнения частицами, при этом наиболее выраженная корреляция – с измерениями относительной влажности, предшествующими измерениям концентрации  $PM_{2.5}$  (со сроком наблюдения  $i-1$ ).

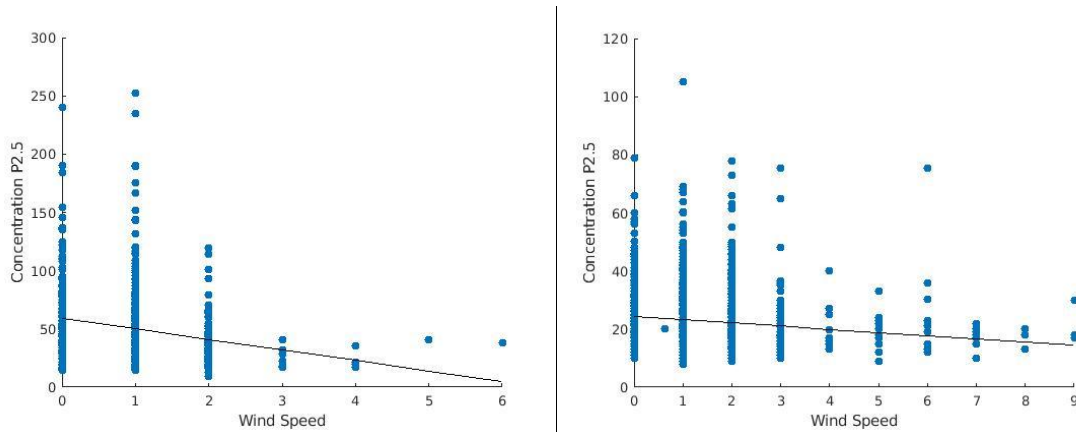


Рисунок 5 – Зависимость концентраций  $PM_{2.5}$  от скорости ветра  $Ws$ :  
 а)  $PM_{2.5}(i) = -12.5805 * Ws(i-4) + 55.0870$  для периода 09/02/2019 – 23/03/2019;  
 б)  $PM_{2.5}(i) = -1.0922 * Ws(i-5) + 24.2808$  для периода 24/03/2019 – 31/10/2019

Таблица 4 – Корреляционные коэффициенты и коэффициенты уравнений линейной регрессии  $PM_{2.5} = k * RH + b$

$RH$ (Относительная влажность)	$k$	$b$	$mean$	$std$	$R$
09/02/2019 – 25/11/2019					
$i$	0.2035	18.5099	54.6906	23.5834	0.2166
$i-1$	0.1431	21.8200	54.6906	23.5834	0.1522
24/03/2019 – 31/10/2019					
$i$	-0.0625	26.0481	49.2655	21.9713	-0.1404
$i-1$	-0.1109	28.4365	49.2655	21.9713	-0.2493
$i-2$	-0.1059	28.1930	49.2655	21.9713	-0.2382
$i-3$	-0.0812	26.9734	49.2655	21.9713	-0.1825
09/02/2019 – 23/03/2019 01/11/2019 – 25/11/2019					
$i$	0.2300	34.2322	71.9026	20.0114	0.1351
$i-1$	0.0660	46.0228	71.9026	20.0114	0.0388

На рисунке 6 представлены графики изменения  $PM_{2.5}$  в зависимости от относительной влажности  $RH$  для периодов 09/02/2019 - 25/11/2019 и 24/03/2019 - 31/10/2019.

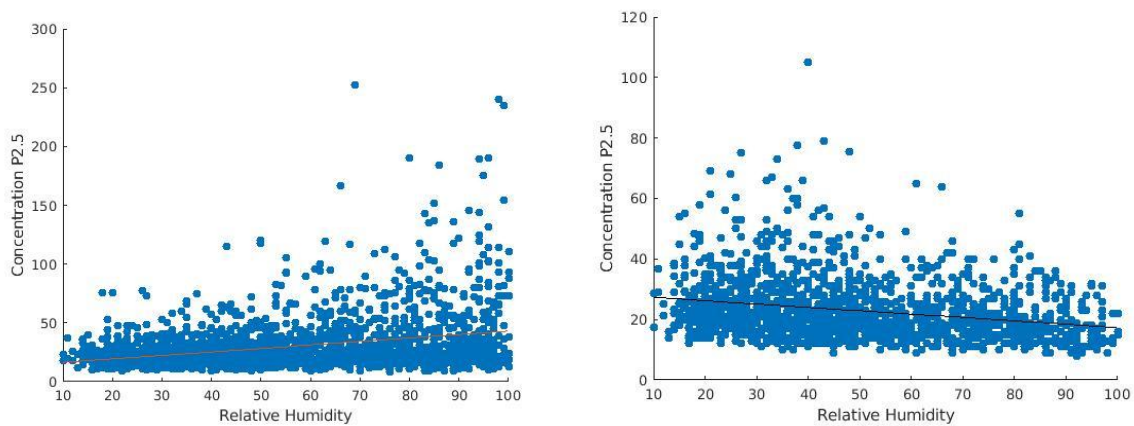


Рисунок 6 – Зависимость концентраций  $PM_{2.5}$  от относительной влажности:  
 а)  $PM_{2.5}(i) = 0.2035 * RH(i) + 18.5099$  для периода 09/02/2019 – 25/11/2019;  
 б)  $PM_{2.5}(i) = -0.1109 * RH(i-1) + 28.4365$  для периода 24/03/2019 – 31/10/2019

Оценка влияния атмосферного давления  $P$  на изменение концентрации  $PM_{2.5}$  представлена в таблице 5. Цифры показывают, что концентрации  $PM_{2.5}$  немного увеличиваются с увеличением атмосферного давления для всего периода наблюдений и зимнего периода. Однако в летний период зависимость обратная, но несущественная.

Таблица 5 – Корреляционные коэффициенты и коэффициенты уравнений линейной регрессии  $PM_{2.5}=k*P+b$

$P$ (Атмосферное давление)	$k$	$b$	$mean$	$std$	$R$
09/02/2019 – 25/11/2019					
$i$	0.9425	-846.4854	929.5938	6.1097	0.2641
$i-1$	0.9344	-838.9812	929.5938	6.1097	0.2570
$i-2$	0.9276	-832.6728	929.5938	6.1097	0.2548
24/03/2019 – 31/10/2019					
$i$	-0.0635	81.8786	928.3351	5.4428	-0.0362
$i-1$	-0.1162	130.8185	928.3351	5.4428	-0.0646
$i-2$	-0.1420	155.6084	928.3351	5.4428	-0.0795
$i-3$	-0.1081	123.2850	928.3351	5.4428	-0.0601
09/02/2019 – 23/03/2019 01/11/2019 – 25/11/2019					
$i$	1.2	-1055.7	933.5004	6.4654	0.2244
$i-1$	1.2	-1034.7	933.5004	6.4654	0.2197
$i-2$	1.2	-1073.4	933.5004	6.4654	0.2270

На рисунке 7 представлены графики изменения  $PM_{2.5}$  в зависимости от атмосферного давления  $P$  для периодов 09/02/2019 - 25/11/2019 и 24/03/2019 - 31/10/2019.

Для оценки влияния осадков в настоящем исследовании была введена безразмерная величина – показатель осадков  $PR$ , влияние которого на концентрацию  $PM_{2.5}$  представлено в таблице 6. Как и следовало ожидать, для всех периодов наблюдений корреляции отрицательные, однако они несущественные для всего периода и зимнего периода и более выраженные для летнего периода, при этом большее влияние имеет  $PR$ , измеренный в срок  $i-2$ . На рисунке 8 представлен график изменения  $PM_{2.5}$  в зависимости от показателя осадков  $PR$  для этого периода.

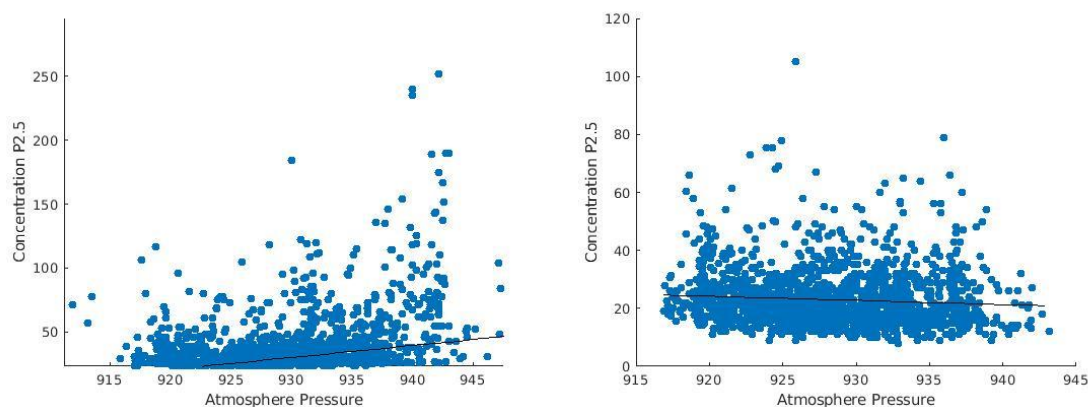


Рисунок 7 – Зависимость концентраций  $PM_{2.5}$  от атмосферного давления:  
 а)  $PM_{2.5}(i) = 0.9425*P(i) - 846.4854$  для периода 09/02/2019 – 25/11/2019;  
 б)  $PM_{2.5}(i) = -0.142*P(i-1) + 155.6084$  для периода 24/03/2019 – 31/10/2019

Таблица 6 – Корреляционные коэффициенты и коэффициенты уравнений линейной регрессии  $PM_{2.5}=k*PR+b$

<i>PR</i> (Показатель осадков)	<i>k</i>	<i>b</i>	<i>mean</i>	<i>std</i>	<i>R</i>
09/02/2019 – 25/11/2019					
<i>i</i>	-4.9672	30.1508	0.1031	0.2726	-0.0612
<i>i-1</i>	-6.0344	30.2585	0.1031	0.2726	-0.0741
<i>i-2</i>	-7.7348	30.4310	0.1031	0.2726	-0.0949
<i>i-3</i>	-7.1472	30.3694	0.1031	0.2726	-0.0877
24/03/2019 – 31/10/2019					
<i>i</i>	-4.5779	23.4398	0.1026	0.2802	-0.1312
<i>i-1</i>	-5.2161	23.5072	0.1026	0.2802	-0.1496
<i>i-2</i>	-6.6122	23.6547	0.1026	0.2802	-0.1899
<i>i-3</i>	-5.8863	23.5818	0.1026	0.2802	-0.1693
09/02/2019 – 23/03/2019 01/11/2019 – 25/11/2019					
<i>i</i>	-6.5737	51.4444	0.1048	0.2471	-0.0474

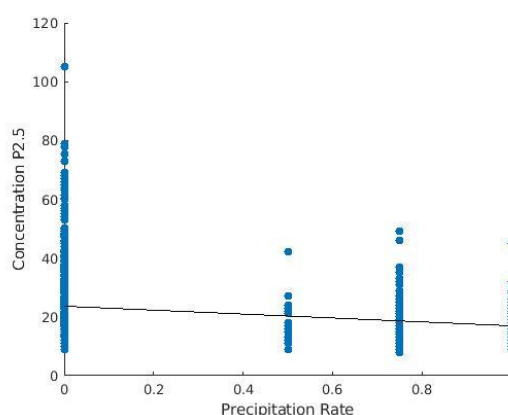


Рисунок 18 – Зависимость концентраций *PM2.5* от показателя осадков *PR*:  
 $PM2.5(i) = -6.6122 * PR(i-2) + 23.6547$  для периода 24/03/2019 – 31/10/2019

**Выводы.** Из таблиц 1–5 видно, что существует слабая и умеренная корреляция (как положительная, так и отрицательная) между концентрациями *PM2.5* и метеорологическими параметрами, измеренными в текущий и прошлые сроки, при этом в летний период корреляции менее выраженные. Наилучшие взаимосвязи для летнего периода 24/03/2019 – 31/10/2019 обнаружены между концентрациями *PM2.5* и измерениями температуры воздуха *T* в предшествующий срок измерений *i-1* ( $R = 0.1768$ ), температуры точки росы *Td* в срок измерений *i-2* ( $R = -0.1857$ ), интенсивностью осадков *PR* в срок измерений *i-2* ( $R = -0.1899$ ), влажностью *RH* в срок измерений *i-1* ( $R = -0.2493$ ), скоростью ветра в срок измерений *i-5* ( $R = -0.1280$ ). Корреляция между концентрациями *PM2.5* и давлением незначительная:  $R = -0.0795$ . Для зимних периодов времени 09/02/2019 – 23/03/2019 и 01/11/2019 – 25/11/2019 характерна большая инерционность процессов и более выраженные корреляции: наилучшие взаимосвязи обнаружены между концентрациями *PM2.5* и измерениями температуры точки росы *Td* в срок измерений *i-5* ( $R = -0.2492$ ), скоростью ветра в срок измерений *i-6* ( $R = -0.2453$ ), и давлением в срок измерения *i-2* ( $R = 0.2270$ ). Корреляция между концентрациями *PM2.5* и измерениями температуры воздуха *T* в срок измерений *i* – отрицательная ( $R = -0.139$ ), влажностью *RH* в срок измерения *i* – положительная и малозначительная ( $R = 0.1351$ ), интенсивностью осадков *PR* в срок измерений *i* – незначительная ( $R = -0.0474$ ).

Полученную информацию можно использовать при построении мульти-регрессионных и нейросетевых моделей прогноза концентраций PM<sub>2.5</sub> и индекса качества воздуха AQI, учитывающих метеорологические факторы.

### *Литература*

1. Gamze Özel Kadilar, Cem Kadilar. 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>.
2. Ebru Kavak Akpinar<sup>1</sup>, Sinan Akpinar, Hakan Fehmi Öztop. Statistical analysis of meteorological factors and air pollution at winter months in Elazig, Turkey // Journal of Urban and Environmental Engineering, v.3, n.1, p.7–16. 2009.
3. Deniz Genc, Canan Yesilyurt, Gurdal Tuncel. Air pollution forecasting in Ankara, Turkey using air pollution index and its relation to assimilative capacity of the atmosphere // Environ Monit Assess, 166:11–27, 2010. DOI 10.1007/s10661-009-0981-y
4. Turahoglu F.S., Nuhoglu A. & Bayraktar H. Impact of some meteorological parameters on SO<sub>2</sub> and TSP concentration in Erzurum, Turkey, Chemosphere 59, 1633–1642. 2005.
5. Ezzatian V. The study of the impacts of meteorological parameters on the air quality index in the Esfahan Cite // The 10<sup>th</sup> Int. Meetings on Statistical Climatology, August 20 to 24 2007, Beijing, China.
6. Dey S., Gupta S., Chakraborty A., Sibanda P. Influences of boundary layer phenomena and meteorology on ambient air quality status of an urban area in eastern India // Atmosfera, vol.31,no.1, 2018. <http://dx.doi.org/10.20937/atm.2018.31.01.05>.
7. Верзунов С.Н., Лыченко Н.М. Анализ и АРИМА-модели динамики изменения концентрации PM<sub>2.5</sub> в атмосферном воздухе г. Бишкек // Проблемы автоматизации и управления. 2019.– № 1 (36). – С. 21–30.
8. Современное прогнозирование. [Электронный ресурс]. URL: <https://forecasting.svetunkov.ru/etextbook/> (дата обращения: 30.09.2019).
9. 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: 30.11.2019).
10. Сайт «Погода и Климат» <http://www.pogodaiklimat.ru>, (дата обращения: 30.11.2019).

**Л.И.Великанова, Н.М.Лыченко**

*Институт машиноведения и автоматизации НАН КР, Бишкек, Кыргызстан*

*E-mail: [ludvel@mail.ru](mailto:ludvel@mail.ru), [nlychenko@mail.ru](mailto:nlychenko@mail.ru)*

## **МУЛЬТИРЕГРЕССИОННЫЕ И ОБОБЩЕННО-РЕГРЕССИОННЫЕ НЕЙРОСЕТЕВЫЕ МОДЕЛИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЗАГРЯЗНЕНИЯ PM2.5 В Г. БИШКЕК С УЧЕТОМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

Разработаны модели краткосрочного прогноза загрязнения атмосферного воздуха г. Бишкек частицами PM2.5 для летнего периода времени на основе линейной мультирегрессионной модели и обобщенно-регрессионной нейросетевой модели (GRNN) и с учетом метеорологических параметров. При разработке нейросетевой модели предложено декомпонировать исходные данные по срокам измерений. Это позволило уменьшить ошибку прогноза в сравнении с мультирегрессионной моделью.

**Ключевые слова:** прогноз концентраций PM2.5, мультирегрессионные модели, обобщенно-регрессионная нейронная сеть GRNN, ошибка прогноза.

**Введение.** Прогноз загрязнений воздуха в приземном слое атмосферы – актуальная и одна из основных природоохранных задач, которой в мире в последнее время уделяется все большее внимание. Зная ожидаемые показатели загрязнения, можно планировать мероприятия по защите населения от неблагоприятного воздействия загрязнителей, находящихся в атмосферном воздухе, решать задачи управления процессами загрязнения, ограничивая, например, воздействия источников загрязнений. Поскольку для г. Бишкек проблема загрязнения атмосферного воздуха стоит крайне остро, то и построение прогностических моделей на основе актуальных для города данных – важная задача, требующая исследования. В [1] опубликованы результаты построения прогностической модели из класса ARIMA-моделей (авторегрессионных интегрированных моделей со скользящим средним), которая может быть использована для прогноза концентрации PM2.5 на основе данных наблюдений за концентрациями за прошедшие четверо суток – для зимнего периода и двое суток – для летнего периода. Однако интересной представляется задача прогноза загрязнений с учетом метеорологических факторов. В литературе достаточно широко представлены соответствующие публикации, краткий обзор некоторых из них приведен в [2]. В [2] проведена оценка влияния метеорологических факторов (таких, как скорость ветра, температура, относительная влажность воздуха, температура точки росы, интенсивность осадков и атмосферное давление) на процесс загрязнения воздуха г. Бишкек частицами PM2.5. в период с 9 февраля по 25 ноября 2019 г. Показано, что существует слабая и умеренная корреляция (как положительная, так и отрицательная) между концентрациями PM2.5 и метеорологическими параметрами, измеренными в текущий и прошлые сроки. Представляется интересным использование этой информации в прогностических моделях на основе множественной регрессии и нейросетевых технологий [3-6], позволяющих одновременно учитывать большое количество влияющих параметров, и наиболее полно отражать характерные для исследуемой системы причинно-следственные связи между параметрами.

В настоящей работе представлены результаты построения модели краткосрочного прогноза загрязнения воздуха г. Бишкек частицами PM2.5 с учетом метеорологических



факторов для летнего периода времени (24/03/2019 – 31/11/2019) на основе обобщенно-регрессионной нейронной сети (GRNN) и сравнения эффективности полученной модели с линейной мультирегрессионной моделью. Информационная база исследования формировалась на основе данных загрязнения частицами Pm2.5 атмосферного воздуха в городе Бишкек [7] и архивных данных метеослужбы [8].

**Модели и методы.** *Мультирегрессионные модели.* Общее уравнение линейной множественной регрессии может быть выражено как [9]:

$$y_t = b + k_1 x_{1t} + k_2 x_{2t} + \dots + k_m x_{mt} + e_t \quad (1)$$

где  $b$  – константа регрессии,  $k_1, k_2, \dots, k_m$  – коэффициенты регрессии,  $m$  – количество независимых переменных (факторов, предикатов). Значения константы и коэффициентов определяются с использованием метода наименьших квадратов, который минимизирует ошибку  $e_t = (y_t - y_{ft})$  или остатки модели. Для определения показателя качества соответствия линейной модели обычно используется коэффициент детерминации  $R^2$  или множественный коэффициент корреляции  $R$ :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (y_t - y_{ft})^2}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2}.$$

Для построения регрессионной модели в настоящем исследовании был использован метод ступенчатой (пошаговой) регрессии, суть которого заключается в отборе из большого количества предикатов  $x$  небольшой подгруппы переменных, которые вносят наибольший вклад в вариацию зависимой переменной  $y$ . При этом в модель регрессии (1) последовательно включаются факторы, и после этого проверяется их значимость, т.е. определяется, насколько уменьшается сумма квадратов остатков и увеличивается величина  $R^2$  (прямой метод). Либо в уравнение регрессии включаются все потенциальные независимые переменные и затем устраняются те, которые не являются статистически значимыми на основе t-критерия Стьюдента. Либо используются оба метода, при этом выбор переменной прекращается, когда переменные больше не соответствуют критериям ввода и удаления. Фактор является незначимым, если его включение в уравнение регрессии только изменяет значение коэффициентов регрессии, не уменьшая значительно среднюю сумму квадратов остатков. Если при включении в модель соответствующего факторного признака величина множественного коэффициента корреляции  $R$  увеличивается, а коэффициент регрессии не изменяется (или меняется незначительно), то данный признак существен и его включение в уравнение регрессии необходимо. При построении мультирегрессионной модели концентрации PM2.5 рассматривались как зависимые переменные. Метеопараметры: температура воздуха, температура точки росы, влажность воздуха, скорость ветра, давление, интенсивность осадков рассматривались как независимые переменные.

*Нейросетевые модели GRNN.* Модели на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) активно используются в прогнозировании, поскольку они обладают особенностью, состоящей в том, что сеть умеет находить зависимости между данными путем анализа большого количества подобных примеров или паттернов. Существуют различные варианты архитектуры нейронных сетей, однако в настоящем исследовании использовалась обобщенно-регрессионная нейронная сеть GRNN (Generalized Regression Neural Network) [10], что обусловлено следующими ее преимуществами:

- возможность моделирования нелинейных связей между входными и выходными параметрами;
- архитектура сети фиксирована и не нуждается в определении;
- высокая скорость обучения.

Архитектура сети GRNN показана на рисунке 1. Первый слой – это радиальный базисный слой с числом нейронов, равным числу элементов  $Q$  обучающего множества; в качестве начального приближения для матрицы весов выбирается массив  $\mathbf{P}^1$ ; смещение  $\mathbf{b}^1$  устанавливается равным вектор-столбцу с элементами  $0.8326/spread$ . Функция  $dist$  вычисляет расстояние между вектором входа и вектором веса нейрона; вход функции активации  $\mathbf{n}^1$  равен поэлементному произведению взвешенного входа сети на вектор смещения; выход каждого нейрона первого слоя  $\mathbf{a}^1$  является результатом преобразования вектора  $\mathbf{n}^1$  радиальной базисной функцией  $radbas$ . Если вектор веса нейрона равен транспонированному вектору входа, то взвешенный вход равен 0, а выход функции активации – 1. Если расстояние между вектором входа и вектором веса нейрона равно  $spread$ , то выход функции активации будет равен 0.5. Выход первого слоя можно выразить формулой

$$A^1 = radbas(\|W - X\| \cdot B),$$

где  $A^1$  – выход первого слоя; функция  $radbas$  – радиально-базисная функция;  $W$  – матрица весов первого слоя сети;  $X$  – входной вектор;  $B$  – вектор порогов первого слоя. Второй слой – это линейный слой с числом нейронов, также равным числу элементов  $Q$  обучающего множества, причем в качестве начального приближения для матрицы весов  $LW^{21}$  выбирается массив  $\mathbf{T}$ . Во втором слое используется блок `normprod` для вычисления нормированного скалярного произведения строки массива весов  $LW^{21}$  и вектора входа  $\mathbf{a}^1$  в соответствии со следующим соотношением:

$$n^2 = \frac{LW^{21}a^1}{sum(a^1)}$$

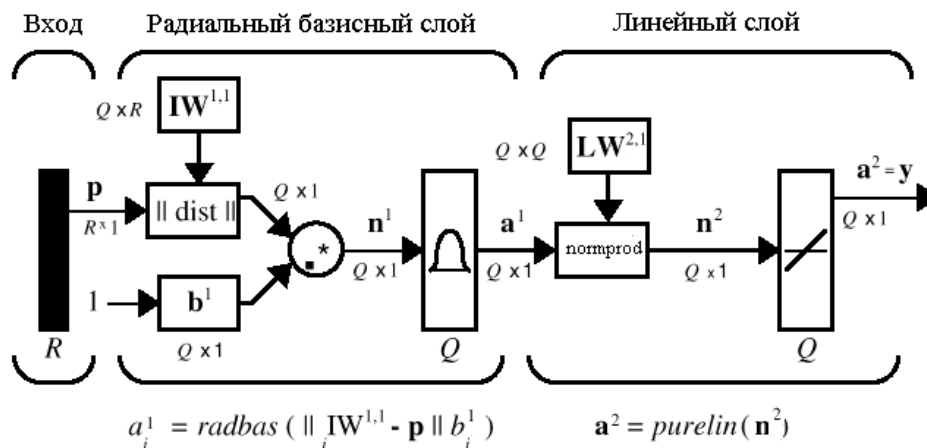


Рисунок 1 – Архитектура сети GRNN

Предположим [10], что имеем вектор входа  $\mathbf{p}_i$ , близкий к одному из векторов входа  $\mathbf{p}$  из обучающего множества. Этот вход  $\mathbf{p}$  генерирует значение выхода слоя  $\mathbf{a}_i^1$ , близкое к 1. Это приводит к тому, что выход слоя 2 будет близок к  $\mathbf{t}_i$ . Если параметр влияния  $spread$  мал, то радиальная базисная функция характеризуется резким спадом и диапазон входных значений, на который реагируют нейроны скрытого слоя, оказывается весьма малым. С увеличением параметра  $spread$  наклон радиальной базисной функции становится более гладким, и в этом случае уже несколько нейронов реагируют на значения вектора входа. Тогда на выходе сети формируется вектор, соответствующий среднему нескольких целевых векторов, соответствующих входным векторам обучающего множества, близких к данному вектору входа. Чем больше значение параметра  $spread$ , тем большее число нейронов участвует в формировании среднего значения, и в итоге функция, генерируемая сетью, становится более гладкой.

Для оценки эффективности моделей и сравнения их прогностических свойств были использованы следующие оценки [9].

1. Средняя квадратичная ошибка (Mean Squared Error, *MSE*):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (e_t)^2,$$

где  $e_t = (y_t - y_{ft})$  - ошибка прогноза или остатки модели.

Эта ошибка сильно подвержена влиянию выбросов (из-за квадрата в формуле). Поэтому в результате использования этого критерия предпочтение отдаётся менее точным моделям (посредственно спрогнозировавшим данные, но при этом не допустившим ни одной большой ошибки).

2. Квадратный корень из средней квадратичной ошибки (Root Mean Squared Error, *RMSE*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (e_t)^2}.$$

3. Средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error, *MAE*):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |e_t|.$$

Эту ошибку трудно интерпретировать, с ее помощью можно проводить сравнение только между моделями по одному ряду данных.

4. Средняя абсолютная процентная ошибка (Mean Absolute Percentage Error, *MAPE*):

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{|e_t|}{y_t} 100\%$$

Это коэффициент, не имеющий размерности, с очень простой интерпретацией: ошибка составила  $n\%$  от фактических значений. Из-за деления на фактические значения этот коэффициент чувствителен к масштабу переменных (при  $y_t$ , близких к нулю, *MAPE* стремительно возрастает).

**Построение линейной мультирегрессионной модели.** Описание исходных данных для исследования представлено в [2]. Восстановление пропущенных значений временных рядов осуществлялось согласно алгоритму, предложенному в [11]. Архивные данные были разделены на 2 части: обучающее множество – данные измерения  $PM_{2.5}$  и метеорологических параметров по г. Бишкек за период с 24.03.2019 по 31.07.2019 г.; тестовое множество – данные измерения за период с 01.08.2019 по 18.08.2019 г.

Из таблиц 1–6 [2] видно, что для летнего периода времени (24/03/2019 – 31/10/201) наилучшие взаимосвязи обнаружены между концентрациями  $PM_{2.5}$  и измерениями температуры воздуха  $T$  в предшествующий срок измерений  $i-1$  ( $R=0.1768$ ), температуры точки росы  $Td$  в срок измерений  $i-2$  ( $R=-0.1857$ ), интенсивностью осадков  $PR$  в срок измерений  $i-2$  ( $R=-0.1899$ ), влажностью  $RH$  в срок измерений  $i-1$  ( $R=-0.2493$ ), скоростью ветра в срок измерений  $i-5$  ( $R=-0.1280$ ). Корреляция между концентрациями  $PM_{2.5}$  и давлением незначительная:  $R=-0.0795$ . Используя эту информацию в качестве исходной, на обучающей выборке 24/03/2019 – 29/08/2019 была построена линейная мультирегрессионная модель (см. таблицу 1), учитывающая все перечисленные относительно существенные факторы (температура точки росы, температура воздуха, относительная влажность, скорость ветра, интенсивность осадков):

$$PM_{2.5}(i) = b + k_1 * Td(i-2) + k_2 * T(i-1) + k_3 * PR(i-2) + k_4 * Ws(i-5) + k_5 * RH(i-1).$$

Таблица 1 – Линейные мультирегрессионные модели

Teaching set: 24/03/2019 – 31/07/2019									
$PM2.5(i) = b + k_1 * Td(i-2) + k_2 * T(i-1) + k_3 * PR(i-2) + k_4 * Ws(i-5) + k_5 * RH(i-1)$									
<i>b</i>	<i>k<sub>1</sub></i>	<i>k<sub>2</sub></i>	<i>k<sub>3</sub></i>	<i>k<sub>4</sub></i>	<i>k<sub>5</sub></i>	<i>R</i>	<i>MAPE</i>	<i>MAE</i>	<i>MSE</i>
13.1054	-0.4092	0.4569	-1.9980	-0.0671	0.0550	0.3183	0.284	7.440	134.4
$PM2.5(i) = b + k_1 * Td(i-2) + k_2 * T(i-1) + k_3 * PR(i-2) + k_4 * PM2.5(i-1) + k_5 * PM2.5(i-2)$									
<i>b</i>	<i>k<sub>1</sub></i>	<i>k<sub>2</sub></i>	<i>k<sub>3</sub></i>	<i>k<sub>4</sub></i>	<i>k<sub>5</sub></i>	<i>R</i>	<i>MAPE</i>	<i>MAE</i>	<i>MSE</i>
10.4621	-0.4235	0.4930	-2.9192	0.0537	0.0432	0.3514	0.2772	5.867	70.11
Testing set: 01/08/2019-18/08/2019									
$PM2.5(i) = b + k_1 * Td(i-2) + k_2 * T(i-1) + k_3 * PR(i-2) + k_4 * PM2.5(i-1) + k_5 * PM2.5(i-2)$									
<i>b</i>	<i>k<sub>1</sub></i>	<i>k<sub>2</sub></i>	<i>k<sub>3</sub></i>	<i>k<sub>4</sub></i>	<i>k<sub>5</sub></i>	<i>R</i>	<i>MAPE</i>	<i>MAE</i>	<i>MSE</i>
10.4621	-0.4235	0.4930	-2.9192	0.0537	0.0432	0.3514	0.2087	4.395	43.57

В таблице 1 также представлены коэффициенты множественной корреляции *R* между концентрациями PM2.5 и метеорологическими параметрами, средняя квадратическая ошибка модели *MSE*, средняя абсолютная ошибка *MAE*, средняя абсолютная процентная ошибка *MAPE*.

Затем, используя метод пошаговой множественной линейной регрессии, получена итоговая регрессионная модель, также представленная в таблице 1:

$$PM2.5(i) = b + k_1 * Td(i-2) + k_2 * T(i-1) + k_3 * PR(i-2) + k_4 * PM2.5(i-1) + k_5 * PM2.5(i-2).$$

В этой модели исключены факторы: скорость ветра *Ws* и относительная влажность *RH* как имеющие наименьшие регрессионные коэффициенты. Для учета инерционности процесса загрязнения в модель включены измерения PM2.5 в (*i-1*)-ый и (*i-2*)-ой сроки измерения.

Полученная модель применена для восстановления концентрации PM2.5 на тестовой выборке: с 05/09/2019 по 15/09/2019. На рис. 5 представлены вычисленные на основе этой модели и измеренные (наблюденные) значения концентраций.

**Построение нейросетевой модели.** На первом этапе были исследованы различные варианты обучения и моделирования прогнозных значений PM2.5 с использованием вышеприведенных параметров (исключая давление, как несущественный фактор) с различной историей и прогнозом метеослужбы на всем диапазоне сроков измерения *i* (полная выборка, *i* = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 час). Данные были разделены на 2 части:

- обучающее множество – данные измерения Pm2.5 и метеорологических параметров по г. Бишкек за период с 24.03.2019г. по 31.07.2019г. (1040 сроков измерения);
- тестовое множество – данные измерения за период с 01.08.2019 по 18.08.2019 г. (144 срока измерения).

Было проведено обучение ИНС GRNN для 10 вариантов входных векторов (см. таблицу 2). Размеры векторов варьировались от 5 до 14 признаков. Здесь, так же, как и в [2], *i-1*, *i-2* – сроки предыдущих измерений (на 3 часа и на 6 часов ранее).

Таблица 2. Варианты наборов признаков во входных векторах при обучении и моделировании ИНС

№ варианта	Контролируемые параметры						Размер входного вектора
	Pm2.5	Ws	PR	Td	T	RH	
1	<i>i-1</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>		<i>i</i>	5
2	<i>i-1</i>	<i>i</i>	<i>i</i>		<i>i</i>	<i>i</i>	5
3	<i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	<i>i-1</i>		<i>i-1</i>	7
4	<i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>		<i>i-1</i>	<i>i-1</i>	7
5	<i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>		<i>i</i> <i>i-1</i>	9
6	<i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	11
7	<i>i-1</i> <i>i-2</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>		<i>i</i> <i>i-1</i>	10
8	<i>i-1</i> <i>i-2</i> <i>i-3</i> <i>i-4</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>			10
9	<i>i-1</i> <i>i-2</i> <i>i-3</i> <i>i-4</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>		<i>i</i> <i>i-1</i>	12
10	<i>i-1</i> <i>i-2</i> <i>i-3</i> <i>i-4</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	<i>i</i> <i>i-1</i>	14

Результаты моделирования PM2.5 при использовании полной выборки показали неудовлетворительные результаты для всех вариантов модели. Среднеквадратическая ошибка *MSE* принимала значения от 59,93 до 81,38, средняя абсолютная процентная ошибка *MAPE* – от 25,38% до 31,10%. Одна из причин этого в том, что данные не вполне отвечают требованиям, предъявляемым к обучающим множествам нейронных сетей. Исходные данные обязательно должны быть непротиворечивы. Между тем, для одинаковых входных векторов нередко имеются резко отличающиеся значения функции цели, что объясняется влиянием дополнительных природных и техногенных факторов, например, направление ветра, возгорание отдельных объектов и т.п. Для решения этой проблемы необходимо увеличить размерность пространства признаков (количество компонент входного вектора, соответствующего образцу). Но при увеличении размерности пространства признаков может возникнуть ситуация, когда число примеров может стать недостаточным для обучения сети, и она вместо обобщения просто запомнит примеры из обучающей выборки и не сможет корректно функционировать. Решением этой проблемы может стать увеличение количества входных векторов обучающего множества за счет новых наблюдений.

Кроме того, как видно из рисунка 1 [2], диапазон значений PM2.5 достаточно широкий. Способность нейронной сети к обобщению на таком диапазоне также может привести к потере точности обучения. Для уменьшения разброса значений PM2.5 была

проведена декомпозиция значений параметров по срокам измерения. Размеры обучающих и тестовых множеств сократились в 8 раз (130 примеров обучающих множеств и 18 – тестовых). На рисунке 2 приведены графики значений PM2.5 тестового множества в сроки  $i$  ( $i=1,8$ ). Из этого рисунка наглядно видно, что в большинстве случаев все значения PM2.5 в летний период находятся в пределах принятой в Кыргызстане нормы (35), за исключением срока 21 час, в который достаточно много значений эту норму превышают. Основное влияние на концентрацию в воздухе PM2.5 в г. Бишкек в летнее время оказывает интенсивность транспортной нагрузки.

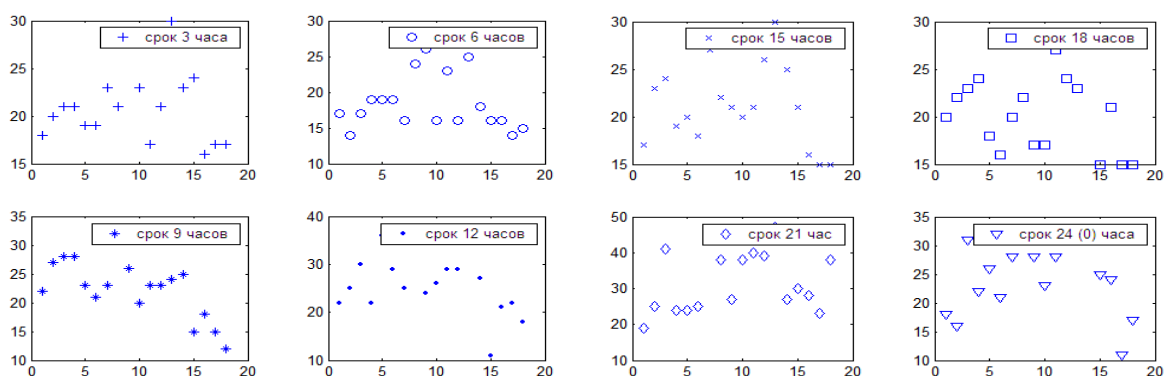


Рисунок 2 – Значения Pm2.5 за тестовый период в сроки измерения метеоданных  $i$  ( $i=1,8$ )

Для каждого срока прогнозирования  $i$  значения Pm2.5 были сформированы обучающие и тестовые множества для 10 вариантов набора параметров, и проведено обучение и моделирование всех ИНС $_{ij}$  ( $i=1,8, j=1,10$ ).

В таблице 3 приведены средние абсолютные процентные ошибки прогнозирования PM2.5. Здесь С.С. – среднесуточная ошибка, С.М. – средняя для модели. Как видно, ошибка прогноза существенно уменьшилась.

Таблица 3 – Средние абсолютные процентные ошибки (в %) прогнозирования Pm2.5 (декомпозиция по срокам измерения)

Сроки измерения	3	6	9	12	15	18	21	24(0)	С.С.
№ варианта	<i>MAPE</i>								
1	17,43	18,68	35,17	26,04	17,70	22,63	28,65	41,22	25,94
2	16,20	18,54	36,17	24,49	16,33	21,87	41,76	28,32	25,46
3	17,01	19,82	24,01	24,77	12,88	19,57	32,03	46,93	24,63
4	16,85	20,84	23,22	27,78	15,99	17,31	33,26	44,53	24,97
5	13,57	14,29	31,13	26,67	18,41	19,25	32,67	49,45	25,68
6	17,00	15,82	27,01	22,55	19,03	22,25	24,23	47,31	24,40
7	19,61	21,19	33,66	26,06	19,42	18,86	20,77	32,42	24,00
8	21,33	15,83	33,05	24,85	24,13	20,91	29,63	29,36	24,89
9	18,20	16,30	34,68	22,05	22,21	20,09	31,80	32,04	24,67
10	18,88	16,61	36,32	25,81	19,65	20,73	30,55	34,10	25,33
С.М.	17,77	17,69	30,65	24,97	19,33	21,91	29,45	39,46	

Из таблицы 3 видно, что самая маленькая ошибка прогноза соответствует наименьшей транспортной загруженности (3 и 6 часов местного времени). Затем следует период от 12 до 18 часов, и самые большие ошибки прогноза в периоды максимального движения транспорта.

На рис. 3 представлены графики наблюдаемых значений концентраций PM2.5 и прогнозные значения, полученные на моделях с полными данными и данными, декомпозированными по срокам измерений: а) – для 3-х часов (модель 1); б) – для 6 часов (модель 7).

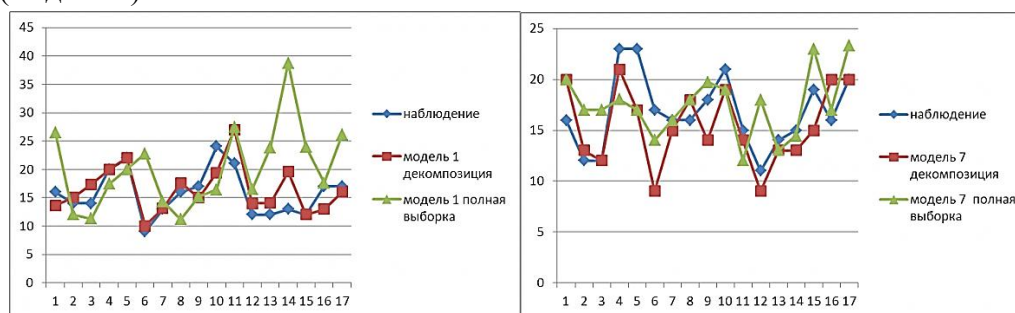


Рисунок 3 – Графики наблюдаемых значений концентраций PM2.5 и прогнозные значения в срок 3 часа (а) и в срок 6 часов (б)

Рассмотрим влияние размерности входных векторов на ошибку прогноза на примере столбцов со сроками 3 и 6 часов таблицы 3. Наименьшую ошибку для этих сроков имеет вариант 5. Обучающее множество для этого варианта состоит из 9-ти размерных векторов, учитывающих прогноз метеопараметров и их предшествующие значения на один срок. Увеличение размерности этих векторов с целью учета истории значений параметров вызывает увеличение ошибки (варианты 6–10). Это связано с недостаточным количеством примеров в обучающих выборках. Существенное увеличение количества наблюдений позволит в дальнейшем рассматривать варианты с большей размерностью векторов.

Варианты 1 и 2, 3 и 4 попарно отличаются между собой использованием температуры воздуха или точки росы. Это не вызывает существенного отличия ошибок, однако использование одновременно обоих этих параметров ошибку увеличивает (вариант 6), что связано с увеличением размерности векторов. Сравнение вариантов 8 и 9 показывает, что добавление во входные векторы параметра «влажность воздуха», хотя и увеличивает размерность векторов, но в некоторые сроки уменьшает ошибки, т.е. является информативно значащим параметром.

В итоге, проверка 10 моделей на выборке с декомпозицией по срокам измерения выявила, что для сроков измерения 3, 6, 15 и 18 часов наиболее приемлемым является 5-ый вариант модели прогноза концентрации Pm2.5. Для увеличения точности прогноза по всем срокам необходимо проводить дальнейшие наблюдения за контролируемыми параметрами и наращивать количество примеров обучающего множества.

**Обсуждение результатов.** Сравнение полученных мультирегрессионной и нейросетевой GRNN моделей прогноза производилось на выборке с 5.09.2019 по 15.09.2019. Ошибки представлены в таблице 4. Как видно, средняя абсолютная процентная ошибка *MAPE* нейросетевой модели незначительно больше мультирегрессионной. Однако средняя абсолютная ошибка, среднеквадратическая ошибка –

меньше. Собственно средняя ошибка прогноза  $e = (y_t - y_{ft})$  у нейросетевой модели значительно меньше. Это иллюстрируют и графики (рисунок 5), на котором представлены наблюдаемые (измеренные) значения концентраций PM2.5 и их прогнозные значения на 3 часа вперед (что соответствует одному сроку наблюдений).

Таблица 4. Ошибки прогнозирования мультирегрессионной и нейросетевой моделей.

Период прогноза: 5.09.2019 – 15.09.2019	MAPE	MAE	MSE	$mean(y_t - y_{ft})$
Мультирегрессионная модель (MR-Model)	0.1935	4.6084	52.7004	5.7681
Нейронная сеть GRNN (ANN-Model)	0.1980	4.3332	43.6020	0.7970

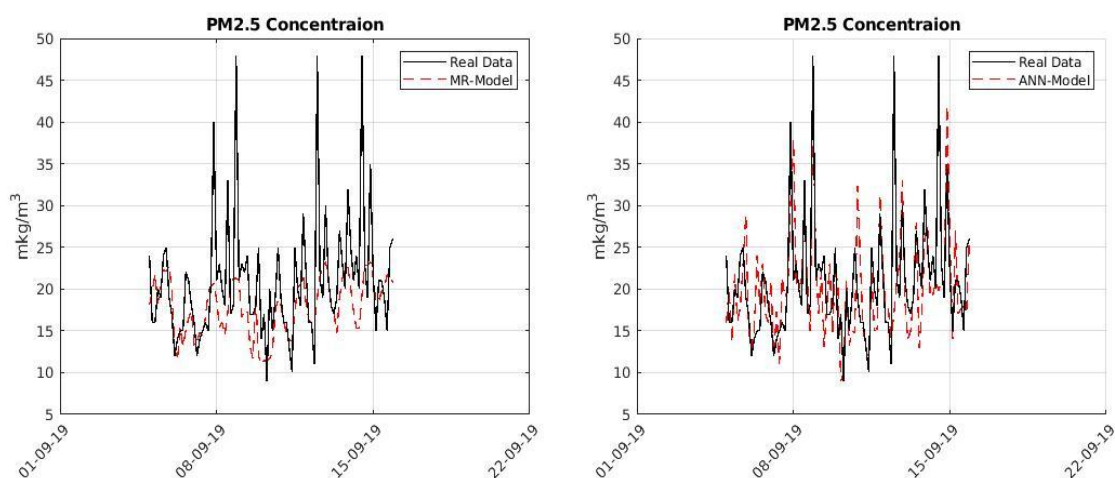


Рисунок 5 – Сравнение мультирегрессионной и нейросетевой GRNN моделей.

Таким образом, прогнозная модель на основе ИНС GRNN более предпочтительная с точки зрения точности прогноза, чем линейная мультирегрессионная, построенная на основе анализа корреляций концентрации загрязнений PM2.5 и метеопараметров. При этом идея декомпозировать данные концентраций PM2.5 и метеопараметров по срокам измерения оправдала себя, поскольку позволила снизить ошибку прогноза. Однако прогноз загрязнения атмосферного воздуха частицами PM2.5 по г. Бишкек проводился по данным лишь одного сенсора, показания которого могут быть зашумлены локальными явлениями (сжигание листьев или бытового мусора, скопление автомобилей в зоне измерения, подметание улицы и т.п.) и не типичны для данного срока измерения и для города в целом. Для полноценного прогноза необходимо снабжение такими сенсорами различных районов города. Это позволит сгладить последствия локальных явлений и уменьшить ошибку прогноза.



***Литература***

1. Верзунов С.Н., Лыченко Н.М. Анализ и ARIMA-модели динамики изменения концентрации PM2.5 в атмосферном воздухе г. Бишкек // Проблемы автоматки и управления. – 2019, №1 (36). – С. 21–30.
2. Лыченко Н.М. Регрессионный анализ метеорологических факторов и концентраций частиц PM2.5 в атмосферном воздухе г. Бишкек // Проблемы автоматки и управления. – 2019. – №2(37). – С. 5–15.
3. Рощупкин Э.В. Нейросетевая модель прогноза загрязнения атмосферного воздуха // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.4.Ч.2, 2010. – С. 266–271.
4. Добровольская Л.А., Ключев Д.С. Прогнозирование степени загрязнения атмосферного воздуха в промышленном регионе // Вісник Приазовського державного університету, серія: Технічні науки, Вип. 36, 2018. – С. 216–222
5. Беляев Н.Н., Славинская Е.С., Кириченко Р.В. Прогноз загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта с учетом химической трансформации вредных веществ // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, №3, 2017, с. 15–20.
6. Якшина Н.В. Нейросетевое моделирование процессов загрязнения окружающей среды // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Екатеринбург, 2007.
7. 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: 30.11.2019).
8. Сайт «Погода и Климат» <http://www.pogodaiklimat.ru>, (дата обращения: 30.11.2019).
9. Современное прогнозирование. [Электронный ресурс]. URL: <https://forecasting.svetunkov.ru/etextbook/> (дата обращения: 30.09.2019).
10. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. МАТЛАБ 6 // Пакеты прикладных программ, Кн.4, 2002, 496 с.
11. Великанова Л.И., Лыченко Н.М. Восстановление пропусков в температурных временных рядах на базе нейросетевых моделей // Проблемы автоматки и управления. – 2018. №2(35). – С. 51–58.

**В. Гайдамако,**

*Институт машиноведения и автоматизации НАН КР, Бишкек*

## **ОБЗОР МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМПОНЕНТ ОБЛАЧНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

В статье рассмотрены направления и способы осуществления мониторинга и оценки производительности компонент облачной среды. В частности, рассматриваются методы мониторинга производительности приложений, облачной инфраструктуры и сети, отдельных компонент. Приводятся распространенные показатели производительности, описываются способы оценки производительности, основанные на измерениях, аналитические способы оценки на базе математического или имитационного моделирования.

**Ключевые слова:** облачные информационно-измерительные системы, мониторинг, мониторинг приложений, мониторинг сети, мониторинг инфраструктуры, оценка производительности, аналитическая оценка, имитационное моделирование

### **Введение**

В парадигме облачных вычислений ресурсы из пула виртуализированных ресурсов предоставляются пользователю по требованию посредством сети. Облачные сервисы – сервисы, которые Центры Обработки Данных (ЦОД) предоставляют пользователям, могут динамически масштабироваться в соответствии с потребностями пользователей, таким образом избавляя их от необходимости содержания собственной инфраструктуры (оборудования и обслуживающего персонала) [1]. Типичными моделями обслуживания являются Инфраструктура-как-сервис (Infrastructure-as-a-Service – IaaS), Платформа-как-сервис (Platform-as-a-Service - PaaS), и Программы-как-сервис (Software-as-a-Service - SaaS). Как сервис могут предоставляться и другие услуги, например физические датчики через виртуализацию предоставляются пользователю в Облачной Информационно-Измерительной Системе (ОИИС) [2], сетевые технологии также виртуализируются и предоставляются как услуга – Network-as-a-Service. Для поддержки работоспособности облака и гарантии качества предоставляемых услуг проводится мониторинг облачной среды – постоянная процедура проверки состояния компонент и управления рабочим процессом облачной инфраструктуры и связанными процессами [3]. Мониторинг облачной среды необходим и провайдеру облачных услуг, и пользователю – клиенту облака. Переводя всю или часть своей инфраструктуры в облако, клиент облака, а в случае ИИС клиентом является также и поставщик датчиков, ожидает, что он сохранит контроль над своими ресурсами в привычном объеме, причем значительную часть работы по поддержанию рабочего состояния ресурсов возьмет на себя провайдер облака. Провайдеру облака мониторинг нужен для обеспечения предоставления услуг гарантированного качества, балансировки нагрузки, планирования использования ресурсов и инфраструктуры, обеспечения безопасности, надежности как инфраструктуры, так и данных, учета использования ресурсов пользователями, своевременного обнаружения и устранения отказов в обслуживании. Сбор и анализ данных для мониторинга производится в режиме реального времени для обеспечения своевременного реагирования и предотвращения возможных нарушений безопасности, отказов в обслуживании и предоставления услуг ненадлежащего качества. ОИИС,

предоставляющая доступ к виртуализированным физическим датчикам, выдвигает свои требования к мониторингу, добавляя такую задачу, как мониторинг физических и виртуальных датчиков.

В настоящее время на ИТ-рынке представлено множество программных продуктов для облачного мониторинга, предлагаются разные подходы к оценке производительности облачных приложений и сервисов.

### **Виды мониторинга облачной среды**

Мониторинг облачной среды включает мониторинг производительности приложений, мониторинг инфраструктуры (серверов, сетевых устройств, систем хранения данных, виртуальных ресурсов), мониторинг сети. Приложения в облаке могут разворачиваться как на физических серверах, так и в динамических средах – Виртуальных Машинах (VM), контейнерах, микросервисах. В таких условиях мониторинг состояния сети становится сложнее – если для мониторинга сетевого трафика обычного приложения может использоваться физический или виртуальный брокер сетевых пакетов, то для мониторинга контейнерных приложений этот метод неприменим, так как контейнеры, на которых работают приложения, могут быть добавляться, удаляться, завершаться, изменяя топологию сети. Контейнерные приложения могут размещаться на одном или нескольких серверах, могут мигрировать, могут использовать шифрованные оверлейные сети, делая свой трафик недоступным для анализа.

Провайдеру облака для оценки производительности отдельного приложения и производительности облака в целом нужна информация о коммуникациях между компонентами инфраструктуры, в том числе виртуальными, о производительности приложений, работающих на VM и контейнерах. При добавлении нового сервера, сетевого устройства, VM или контейнера требуется немедленный старт мониторинга этого компонента, нужно определить какие метрики отслеживать, как собирать, куда отправлять данные мониторинга. При завершении работы или удалении компонента мониторинг должен быть остановлен. [4]

**Мониторинг приложений.** Приложения в облаке – как правило, много-уровневые, многоконтейнерные, распределенные по множеству серверов. Цель системы мониторинга приложений – выявление отклонений от базовой производительности приложения, обнаружение узких мест, даже ошибок в коде, причин падения производительности. Программные продукты для мониторинга приложений собирают и анализируют данные, позволяющие оценить состояние физического оборудования, состояние VM и Java машины, состояние контейнера, поведение приложения, состояние баз данных, кэшей, достижимость сторонних веб-ресурсов. Для мониторинга производительности приложений – сбора событий, метрик, трассировок – используются агенты, размещаемые на сервере, VM или контейнере. Собираемые агентами данные пересылаются в различных направлениях, на сервера мониторинга для сохранения истории, а затем на веб-сервера для визуализации и представления администраторам. ПО для мониторинга приложений – ManageEngine [5], Zabbix [6], Sysdig Monitor [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**], RPTG [8], Prometheus [9].

Для **мониторинга инфраструктуры** также используются агенты, собирающие данные об использовании процессоров, оперативной памяти, дискового пространства, причем они могут собирать такие данные и о контейнерах. В последнее время для управления контейнерами (оркестровки) фактическим стандартом становится открытая система Kubernetes [10], позволяющая производить автоматическое развертывание, масштабирование и управление контейнерными приложениями. Мониторинг самого Kubernetes становится частью мониторинга инфраструктуры, в частности, проект Prometheus [9], предназначенный для сбора метрик из контейнеров Kubernetes [4.] Для

мониторинга инфраструктуры могут использоваться программные продукты Zenoss [11], RPTG[8], Sysdig Monitor [7]. Продукты, используемые для мониторинга сетей, как правило, включают в себя также элементы мониторинга инфраструктуры.

**Мониторинг сетей** основывается на полном доступе к сети и предполагает перехват пакетов. Проводится сбор данных о состоянии всех сетевых устройств, проверяется качество соединений (скорость, потеря пакетов). Также важно отслеживать поведение пользователей для поддержки производительности и обеспечения безопасности. Следует обратить внимание, что, вслед за вычислительными мощностями и средствами хранения, виртуализируются также и сети – появились VLAN, VXLAN и программно-определяемые сети (Software-defined Networks – SDN). Для сбора данных о состоянии виртуальных и контейнерных сетей традиционные методы непригодны. Здесь могут быть использованы два подхода. Первый – на VM и контейнерах устанавливаются агенты, которые собирают и отправляют пакеты на сервера мониторинга, которые обрабатывают пакетные данные и результаты отправляют Веб-серверам для предоставления администраторам. Этот подход используют поставщики ПО мониторинга сетей ExtraHop[12], Gigamon[13] и Nubeva[14] Обработка данных производится на серверах, что снимает часть нагрузки с приложений. Но сами сервера мониторинга могут становиться узким местом. Для децентрализации обработки используется второй подход – обработка пакетов производится агентами, а серверу (или сервису) мониторинга отправляются результаты. Здесь возникает другая проблема – при изменениях в топологии сети требуется распространение изменений. Такого подхода придерживаются в ПО мониторинга CloudLens [15] и инструментарии компании Nubeva [4].

**Мониторинг сетей в контейнерных средах** – используется только для контейнеров и предполагает три подхода: использование сетевого плагина, агентов рабочей нагрузки и вспомогательных sidecar-контейнеров. При использовании первого подхода сетевой интерфейс контейнера является фреймворком (рабочей средой) для сетевого плагина. Трафик, проходящий через сетевой интерфейс, перехватывается виртуальной сетью, обрабатывается и передается по назначению. При использовании агента (агент встраивается в образ контейнера) агент запускается с рабочей нагрузкой, собирает пакеты и отправляет их для дальнейшей обработки или сам обрабатывает их и результаты отправляет для дальнейшего анализа. Агент может быть запущен как отдельный контейнер параллельно с рабочей нагрузкой контейнера («sidecar»), тем самым освобождая основной контейнер от работы по сбору и анализу пакетов. Кроме того, некоторые контейнеры сами могут перехватывать пакеты (Envoy proxy[16]) и могут заменять другие средства перехвата сетевых пакетов.

Можно выделить специфичные направления мониторинга, характерные для облачных сред и, в частности ОИИС.

### **Мониторинг веб-сайтов**

В ОИИС веб-сайт, или портал используется для доступа клиентов облака к своим ресурсам – физическим и виртуальным датчикам и архивным данным, для отображения состояния системы для администраторов облака и сети, для отображения данных, которые могут быть интересны общественности. Это может быть один портал, несколько реплик или несколько разных веб-серверов, размещаемых на физических серверах провайдера облака или в арендуемых облачных структурах. Для мониторинга веб-сайта необходимо собирать и отображать данные о сетевом трафике, доступности, использовании ресурсов, производительности веб-приложений, доступности поиска по имени, времени загрузки страниц. Важным аспектом мониторинга веб-серверов является анализ готовности и производительности веб-сервиса за счет имитации

загрузки из сети. Простой мониторинг доступности веб-сайта может производиться с интервалом 1 -5-10 минут в зависимости от характера контента и статистики обращений. Некоторые параметры сайта должны отслеживаться из разных точек сети с интервалом от 10 секунд до минуты для своевременного решения проблем, например, с DNS-серверами (адрес сайта не распознается, хотя сам сайт физически доступен – ping работает), большим временем отклика, выполнением запланированных задач, долгой загрузкой файлов, подключением к базам данных и долгим ожиданием результатов. Мониторинг работоспособности включает проверки функционала сайта, особенно в случае изменений, с помощью тестовых приложений, генерирующих различные условия.

#### **Мониторинг баз данных**

Производится мониторинг доступности, запросов, процессов, обращений, целостность данных, все, что отражает использование данных в реальном времени. Анализ этих данных позволит вовремя производить изменения в инфраструктуре (обновления, апгрейд серверов) для предотвращения отказов или задержек в выдаче данных.

#### **Мониторинг облачного хранения данных**

Ресурсы хранения разных серверов объединяются в виртуальное пространство хранения (базы данных, распределенные файловые системы). Отслеживается состояние устройств и баз данных, файловых серверов, файлов, связь между серверами хранения, действия пользователей, объем свободных ресурсов хранения.

#### **Мониторинг виртуальных ресурсов**

Ресурсы предоставляются в пользование в виртуальном виде. В ОИИС это ресурсы виртуальных датчиков, ресурсы для хранения, вычислительные ресурсы для обработки данных. Это могут быть VM и контейнеры. Отслеживаются доступность, потребление ресурсов для каждой отдельной VM или контейнера - загрузка процессора, загрузка оперативной памяти, оставшееся место на жестком диске, и т.д. Эта информация необходима также для балансировки нагрузки и обеспечения эластичности – например, при превышении заранее установленных значений загрузки процессора, использования оперативной памяти, свободного дискового пространства могут подключаться дополнительные ресурсы – VM или контейнеры, и при достижении нижних пределов – количество задействованных контейнеров и VM может быть уменьшено.

#### **Мониторинг состояния датчиков**

Мониторинг виртуальных датчиков осуществляется также, как и мониторинг других виртуальных ресурсов – с помощью агентов, устанавливаемых на VM или контейнер. Для мониторинга физических датчиков отслеживается, прежде всего, доступность, соблюдение расписания связи, качество данных. Эти параметры могут собираться и анализироваться как координатором сенсорной сети, так и сервером облака (получающим сенсорную информацию) и сервером мониторинга.

#### **Безопасность приложений в облаке**

Хранение и обработка данных в облаке менее безопасна по сравнению с хранением и обработкой на локальных серверах. В центре обработки данных возможно обеспечить надлежащее обслуживание и безопасность инфраструктуры, но также должна быть обеспечена безопасность при передаче данных и в конечной точке использования. Первой линией защиты может служить, например, двухфакторная аутентификация пользователей и другие протоколы безопасности. Мониторинг использования обеспечивает возможность отслеживания опасных шаблонов действий

пользователя и своевременное принятие мер безопасности в случае определения возможного вторжения.

### **Оценка доступности**

Доступность сервиса (компонента) может быть рассчитана как вероятность отклонения запроса на обслуживание. Вероятность отклонения запроса может зависеть от множества причин – общий объем ресурсов в системе – количество серверов, размера буфера (очереди), пропускной способности сети, методов управления облаком – политики диспетчеризации, применяемой в ЦОД, трафиком в сетях доступа к ЦОД и т.д.

На доступность сервиса, кроме ограниченных ресурсов системы, влияют также отказы и ошибки в работе системы. При проектировании инфраструктуры облака могут быть использованы различные методы повышения устойчивости к отказам, что может привести, с одной стороны, к повышению доступности, но, с другой стороны могут привести к дополнительным задержкам в обслуживании и снижению пропускной способности системы.

Ну и конечно, на доступность сервиса могут повлиять проблемы с сетевым подключением. Это могут быть проблемы с физической невозможностью доступа или, например, с невозможностью доступа к сетевому узлу из-за отказов в работе DNS серверов.

Как определять доступность на практике? Когда сервис будет считаться доступным? Это не такой простой вопрос, и лучше, если он будет оговорен в Соглашении о качестве услуг SLA (Service License Agreement).

В [17] предлагается оценивать доступность сервиса по трем главным группам факторов: :

1. Доступность сети (с учетом провайдера, сетевых карт серверов, маршрутизаторов, коммутаторов, SAN-переключателей и т.д.),
2. Доступность гипервизора, определяющая доступность процессоров и памяти VM
3. Доступность Системы Хранения Данных (СХД).

Произведение значений этих параметров и бюджет составлять интегральный показатель доступности. Для реализации такого подхода использовались агенты, устанавливаемые на ресурсах пользователей, что не всегда приемлемо – пользователь не всегда соглашается на установку дополнительного ПО. Далее использовалась фиксация сбоя сети, но и этот метод показал себя как неудовлетворительный. Тогда было решено создать пул виртуальных машин, максимально сходных с VM пользователей, установить на них агенты и проверять доступность этих машин (подход «sidecar»). Количество таких «тестовых» VM изменяется в зависимости от количества VM пользователей. [17]

При сбое в облаке система мониторинга фиксирует недоступность какой-то из эталонных VM, и это соответствует недоступности части VM заказчика, входящих в пул с эталонной. Исходя из этой статистики и рассчитывается «интегральный показатель доступности», который затем попадает в отчеты заказчику.

### **Метрики (показатели) оценки производительности**

Для успешного осуществления мониторинга необходимо определить измеряемые метрики и их предельные значения. Для каждого вида ресурсов определяются данные, необходимые для управления и обеспечения качества предоставления услуг и принятия информированных решений. Должны быть определены события, требующие мониторинга, регистрации в системных журналах, отчетности, и способы оповещения о них – алерты и уведомления в случаях, требующих немедленного вмешательства

(попытки несанкционированного доступа, превышение порогов использования ресурсов, отказы, отсутствие сетевого соединения с устройствами и т.д.)

В [18] приводится каталог метрик для измерения, разделенный на группы:

**Группа 1 – метрики для оценки коммуникаций** предназначены для оценки качества связи – передачи данных или сообщений между облачными службами или между клиентом и облаком, между датчиками и облаком. Для оценки передачи по TCP/IP MPI (Message Passing Interface) применяются разные показатели.

К метрикам оценки качества коммуникаций относятся:

- частота потери пакетов и коэффициент потерь. Определяется как соотношение между временем потери пакетов и общим временем передачи, а коэффициент потерь определяется как соотношение между потерянными пробными пакетами к общему количеству проб. Доступность измеряется временем потерь, надежность – количеством сбоев;
- соотношение между общим временем работы и временем на сетевые коммуникации. Может быть получена путем сбора данных на множестве приложений в облаке. Показатель может использоваться для качественной оценки влияния коммуникаций на приложения в облаке;
- задержки (время) передачи MPI и TCP/UDP/IP (с, мс, мкс) и
- скорость передачи MPI и TCP/UDP/IP (Б/с, МБ/с, ГБ/с).

**Группа 2. Метрики для оценки вычислительной мощности.** Вычислительная мощность характеризует высокопроизводительную (с большим количеством вычислений) обработку данных в облаке. Для оценки общей производительности облака используются крупномодульные (coarse-grain) облачные приложения, а для оценки производительности вычислений конкретного устройства используются приложения, интенсивно использующие процессор. К метрикам оценки производительности вычислений относятся:

- производительность на тестовом наборе и производительность экземпляра сервиса – измеряют производительность вычислений конкретного экземпляра сервиса в виде процентов от установленного порога. Для определения производительности на тестовом наборе пороговым значением является теоретический максимум для данного тестового набора, а для производительности экземпляра сервиса – теоретический максимум процессора;
- скорость в эластичных вычислительных блоках ECU (Elastic Compute Unit) – используется вместо традиционного FLOPS (количество операций с плавающей точкой в секунду). ECU – это мощность процессора 1.0-1.2 GHz 2007 Opteron или Xeon. Изначально эта метрика использовалась для оценки производительности экземпляра Amazon EC2 [19]
- загрузка процессора – используется для поиска узких мест, препятствующих росту производительности. Например, низкая загрузка процессора при максимальном количестве коммуникации показывает, что передача данных на этот объект является узким местом при данном наборе приложений;

**Группа 3. Оценка эффективности памяти (кэша).** Оперативная память (ОП) и кэш предназначены для обеспечения быстрого доступа к временно сохраняемым данным, получаемым с жесткого диска. Влияние ОП и кэша на общую производительность оценить довольно сложно, поэтому практических методов и метрик оценки производительности ОП/кэша не так много. Кроме обычной оценки размера ОП и кэша, используются следующие метрики:

- скорость обновления оперативной памяти
- среднее время чтения данных из кэша (Mean Hit Time), то есть время доступа к данным, если они находятся в кэше (с);

- время получения/загрузки/отклика кэша (мс);
- скорость передачи одного бита/байта из/в ОП, Мб/с, Гб/с).

**Группа 4. Метрики оценки систем хранения.** Системы хранения используются для хранения данных, получаемых от датчиков, служебных данных о пользователях, датчиках, состоянии системы, собственных данных пользователей и т.д. Данные хранятся долгосрочно, до удаления или остановки сервисов. По сравнению с доступом к памяти и кэшу время доступа к постоянно хранимым данным больше. Метрики оценки систем хранения:

- скорость доступа к одному байту данных (байт/с) – производительность доступа к данным очень маленького размера может быть доминирующей при обмене между устройствами памяти;
- скорость выполнения операций на тестовом наборе (оп/с, ops)
- производительность передачи между Blob и таблицей
- гистограмма скорости получения данных — представляется в виде графика, а не численного значения. Гистограмма наглядно показывает изменения скорости получения данных за период времени, отражает доступность облачного сервиса.
- задержка ввода/вывода на тестовом наборе (мин, с, мс)
- время ввода-вывода данных из Blob/Таблицы/Очереди (с, мс) – Blob/Table/Queue I/O Operation Time. Устройства хранения могут быть трех типов по способу предоставления данных – Blob, таблица или очередь. Типичные операции ввода-вывода для Blob – это выгрузка (Download) и загрузка (Upload); для таблиц - Get, Put и Query; для очереди - Insert, Retrieve, и Remove;
- скорость ввода-вывода бита/байта на тестовом наборе (бит/с, КБ/с, МБ/с);
- скорость ввода-вывода бита/байта из Blob (бит/с, КБ/с, МБ/с)

**Группа 5. Метрики оценки общей производительности.** В дополнение к оценке отдельных физических параметров, существует множество метрик для оценки общей производительности сервисов. Используются для оценки общей производительности коммерческих облачных систем. Некоторые из метрик:

- относительная производительность выше пороговой (отношение). – используется для стандартизации набора результатов оценки производительности для последующего сравнения.
- устойчивая производительность системы (Sustained System Performance (SSP)). Для получения общей производительности облачных сервисов используется набор приложений. Включает другие метрики: геометрическое среднее производительности различных приложений на ядре процессора умножается на количество ядер процессора;
- средневзвешенное время отклика (Average Weighted Response Time (AWRT) – в качестве веса используется потребление ресурсов на запрос, метрика показывает, как долго средний пользователь будет дожидаться завершения запрошенного сервиса. Потребление ресурсов на запрос оценивается как произведение времени выполнения запроса на количество экземпляров сервиса.

**Группа 6. Оценка масштабируемости.** Масштабируемость по-разному определяется для разных контекстов или разных точек зрения. Но, вне зависимости от определения, оценка масштабируемости облачных сервисов неизбежно производится при изменяющейся рабочей нагрузке и/или потребляемых облачных ресурсах. Так как эта варьирующая нагрузка/ресурсы обычно представляются в виде диаграмм и таблиц, метрики также представляются в виде диаграмм и таблиц. Фактически, в отличие от оценки других характеристик производительности, оценка масштабируемости (а также изменчивости) обычно подразумевает сравнение по наборам данных, которое удобно представлять в виде диаграмм и таблиц. Метрики:



- общая производительность (Aggregate Performance) и Падение производительности ниже пороговой (Performance Degradation/Slowdown over a Baseline) – эти две метрики часто используются для оценки масштабируемости облачной системы при увеличивающейся нагрузке. Масштабируемость оценивается с точки зрения рабочей нагрузки;
- увеличение производительности выше пороговой (Performance Speedup over a Baseline) – используется для оценки масштабируемости при различном количестве облачных ресурсов, масштабируемость оценивается с точки зрения ресурсов;
- падение производительности ниже пороговой (Performance Degradation/Slowdown over a Baseline) – эта метрика может быть интуитивно воспринята как противоположная к «Увеличение производительности выше пороговой», но она более значима для отображения масштабируемости, когда запрашиваемый сервис работает в различном количестве экземпляров или с разной рабочей нагрузкой. Масштабируемость оценивается с точки зрения рабочей нагрузки.

**Группа 7. Метрики оценки вариабельности (изменчивости).** В контексте оценки облачных сервисов Изменчивость показывает пределы изменчивости значений конкретного показателя производительности облачного сервиса. Изменчивость результатов оценки может быть вызвана различиями в производительности в зависимости от времени или расположения. Даже в одно время в одном месте в кластере экземпляров сервиса может наблюдаться изменчивость. Метриками также являются таблицы и графики. К метрикам изменчивости относятся:

- среднее, минимальное и максимальное значения какой-либо метрики, представляемые совместно;
- коэффициент вариации (ковариации);
- разница между минимумом и максимумом (%);
- среднее и стандартное отклонение;
- плотность вероятности функции;
- график значений с медианным/средним значением;
- представление нескольких графиков совместно для сравнения;
- представление отдельных графиков;
- таблицы.

**Группа 8. Метрики оценки эластичности.** Оценивают способность быстрого предоставления и освобождения ресурсов облака. Эластичность облачного сервиса означает способность реагировать и на растущую, и на падающую нагрузку. Метрики эластичности оценивают время предоставления или освобождения ресурсов.

- время захвата ресурса (Resource Acquisition Time). Захват ресурса – получение дополнительных ресурсов облака при возрастании нагрузки. Общее время захвата ресурса может быть разделено на время предоставления и время загрузки ресурса. Время предоставления – это интервал между моментом запроса на ресурс и его включением (подачей питания), время загрузки – интервал между предоставлением ресурса и его готовностью к использованию;
- время освобождения ресурса. Освобождение ресурса – это возвращение ставших ненужными ресурсов при падении нагрузки для экономии затрат. Общее время освобождения ресурса делится на время останова и время удаления. Время останова – время остановки работающего облачного ресурса, а время удаления – интервал между моментом полного останова и удалением ресурса из использования.

Это только часть метрик, которые могут использоваться при оценке производительности облачных сервисов, здесь представлены базовые, основные показатели. При планировании мониторинга, а также постановке различных экспериментов следует

выбрать нужные метрики и способы сбора информации о них. В таблице 1 приведены типичные метрики, используемые для оценки производительности облачных сервисов.

Таблица 1 – Типичные метрики, используемые при оценке производительности облачных сервисов

Метрика	Описание
Время отклика сервиса (задержка)	Задержка (время) между запросом на сервис и завершением сервиса
Пропускная способность сервиса	Количество заданий в единицу времени, выполняемое провайдером сервиса
Доступность сервиса	Вероятность принятия запроса провайдером сервиса
Использование системы (коэффициент загрузки системы)	Процент системных ресурсов требуемых для предоставления сервиса
Устойчивость системы	Стабильность производительности системы во времени, особенно при импульсных нагрузках
Масштабируемость системы	Способность системы сохранять производительность при росте нагрузки из-за увеличения размера или объема системы.
Эластичность системы	Способность системы адаптироваться к изменениям нагрузки

### Методы оценки производительности

В целом подходы к оценке производительности облачных услуг по методологии исследования можно разделить на две или даже три большие группы – оценка, основанная на измерениях, оценка, основанная на аналитическом моделировании, оценка, основанная на имитационном моделировании [20, 21]

**Оценка производительности облачных услуг, основанная на измерениях.** Исследования в области производительности облаков начались сразу же после их появления, в то время оценка часто основывалась на измерениях, проводимых на тестовой облачной инфраструктуре (испытательном стенде) с тестовой нагрузкой.

Процедура проведения измерений на облачном испытательном стенде состоит из следующих этапов: определение целей и границ оценки, определение оцениваемых свойств облачных сервисов, определение метрик производительности и выбор тестовых приложений. Далее проводится настройка среды и проводятся эксперименты.

Для методов оценки, основанных на измерениях, очень важна генерация соответствующей тестовой нагрузки. В случае ОИИС это нагрузка, источником которой являются пользователи, а также нагрузка, генерируемая физическими датчиками – данные должны быть своевременно собраны и перенаправлены на соответствующие виртуальные датчики.

**Аналитические методы оценки производительности** облачных сервисов менее затратны по сравнению с методами, основанными на измерениях, так как не требуют испытательных стендов, они основаны на моделировании, как математическом, так и имитационном. Эти методы позволяют оценить влияние большого количества параметров на производительность системы еще на стадии планирования и разработки системы и сервисов.

Классическим подходом к моделированию и анализу компьютерных систем является **Теория Массового Обслуживания (ТМО)**. В [20] приведен обзор моделей, созданных с использованием ТМО. При проведении исследования очень важно создать модель нагрузок с заданными характеристиками, что довольно сложно из-за большого

разнообразия облачных сервисов и приложений. В большинстве исследований предполагалось, что процесс поступления запроса на обслуживание является пуассоновским процессом с экспоненциально распределенным временем между поступлениями заявок (inter-arrival time). Однако, большое разнообразие приложений, использующих разные облачные сервисы, может генерировать рабочие нагрузки с разными шаблонами. Поэтому разработка соответствующих и гибких моделей для рабочих нагрузок облачных сервисов, которые точно представляют трафик, генерируемый широким спектром приложений, является важной открытой проблемой. В ОИИС рабочая нагрузка генерируется физическими датчиками, с одной стороны, и пользователями – с другой. Распределение времени обслуживания во многих работах принималось экспоненциальным или произвольным. Разработка моделей для рабочих нагрузок от датчиков и пользователей является одной из задач моделирования ОИИС.

Методы ТМО обычно применяются для анализа конкретной архитектуры с конкретными допущениями по реализации сервисов. Но введение виртуализации привело к тому, что один и тот же сервис от одного провайдера может быть реализован различным образом для различных пользователей, например, сервисы для разных пользователей могут в разных центрах обработки данных, на серверах разных типов. Реализация сервиса может изменяться со временем, например, из-за обновления системы или перемещения виртуальной миграции на другой сервер. Кроме того, принцип SOA (Service Oriented Architecture, сервис-ориентированная архитектура) в предоставлении облачных услуг позволяет конечным пользователям использовать облачные сервисы без каких-либо знаний об их реализации. Абстракция ресурсов и инкапсуляция сервисов, обеспечиваемая виртуализацией и SOA в облаке, делают любые предположения об определенной архитектуре и технологии реализации облачной системы недопустимыми для оценки производительности с точки зрения пользователя. [20]

**Сетевое исчисление (Network calculus)** [22, 23] сделало возможным подход, основанный на профилировании. Основная идея этого подхода заключается в том, чтобы основывать свое моделирование и анализ на информации, относящейся к качеству обслуживания (Quality of Service – QoS), вместо того, чтобы моделировать какие-либо конкретные реализации сервисов и рабочую нагрузку. Эта информация – значения выбранных показателей (метрик) производительности, описывается в Соглашении об уровне обслуживания (Service License Agreement – SLA). Как правило, сюда включается пропускная способность сервисов, которая должна гарантироваться поставщиком, и максимальная рабочая нагрузка, которую пользователь может предоставить. Если разработать профили для минимальной пропускной способности, гарантируемой поставщиком услуг, и максимальной рабочей нагрузки, генерируемой пользователем, то на их основе можно будет получить некоторые границы для показателей производительности, например, наихудшую задержку обслуживания и максимальную длину очереди запросов на обслуживание. [20] Два ключевых понятия в сетевом исчислении – это кривая поступления запросов и кривая обслуживания. По сути, кривая обслуживания – это функция времени, которая дает нижнюю границу пропускной способности, которую сервер предоставляет клиенту. Точно так же кривая поступления запросов в сетевом исчислении является функцией времени, которая определяет максимальный объем рабочей нагрузки, которую пользователь может сгенерировать в течение произвольного интервала времени. Используя кривые поступления и обслуживания, сетевое исчисление позволяет определить верхнюю границу задержки любого запроса на обслуживание и максимальной длины очереди запросов на сервере.

**Стохастические сети с вознаграждениями** (Stochastic Reward Net – SRN) часто применяются совместно с методами ТМО для оценки производительности облачных сервисов. SRN по существу являются дополненными стохастическими сетями Петри (Stochastic Petri Nets – SPN) с возможностью определения выходных показателей в качестве наградных функций для оценки производительности сложных систем. В [24] авторы применили стратегию подмодели для упрощения моделирования и анализа крупномасштабных систем облачных вычислений IaaS. Для трех основных этапов предоставления услуг – предоставление ресурсов, подготовка ВМ и выполнение – разрабатываются подмодели на основе марковских цепей с непрерывным временем (Continuous-Time Markov Chain CMTC): Затем разрабатывается монолитная модель для представления взаимодействия между тремя этапами с использованием стохастических сетей с вознаграждением (SRN), все подмодели объединяются для получения общих результатов производительности облачной службы.

**Имитационное моделирование** используется, если объект моделирования изучен недостаточно, создание математической модели слишком сложно, нужно осуществить наблюдение за поведением компонент (элементов) процесса или системы в течение определенного периода, объекта моделирования не существует или он недоступен для изучения и наблюдения, наблюдаемые процессы или поведение системы контролируются путем замедления или ускорения явлений в ходе имитации, при изучении поведения системы в случае изменения или внесения новых компонент, в новых ситуациях, а также в проектируемых системах [25]. **Ошибка! Источник ссылки не найден.** Для моделирования облачных систем применяются могут применяться средства моделирования GridSim[26], CloudSim и ее расширения [], GreenCloud [28], ICanCloud [29], Simic [30], SimGrid [31]. В результате моделирования данные о работе компонент собираются в файлы трассировки, которые в дальнейшем используются для анализа поведения моделируемой системы.

### Заключение

Мониторинг облачной среды и оценка производительности облачных сервисов необходима и провайдеру, и клиентам облака. В настоящей статье приводится обзор методов мониторинга производительности приложений, инфраструктуры и сети в облаке, приводятся основные метрики производительности, которые могут быть использованы в дальнейшем при оценке производительности имитационных моделей ОИИС, отдельных сервисов. Рассматриваются подходы к оценке производительности облачных сервисов – оценка на основе измерений и аналитические методы. Аналитические методы оценки используют ТМО, сетевое исчисление, стохастические сети с вознаграждениями, разрабатываются новые методы. Каждый из подходов имеет свои преимущества и недостатки, в таблице 2 приведен их краткий обзор.

Таблица 2 – Преимущества и недостатки основных подходов к оценке производительности облачных сервисов

Метод	Преимущества	Недостатки
<b>Методы, основанные на измерениях</b>	Предоставляют информацию о производительности доступных облачных сервисов; отражают эффективность обслуживания в реалистичных сценариях работы; показывают производительность	Ограничены доступными облачными испытательными платформами и их настройками; проведение тестов затратно, невозможно предсказать производительность при

	сервисов при практическом применении	введении новых сервисов и/или изменении настроек
<b>Методы, основанные на ТМО (могут применяться совместно с SRN)</b>	Отсутствуют затраты на эксперимент, возможно предсказать производительность новых сервисов и настроек, можно оценить влияние большого количества параметров	Трудно моделировать гетерогенную облачную инфраструктуру, трафик различных приложений, может не отражать производительность реальных сценариев обслуживания
<b>Методы профилирования</b>	Применимы к гетерогенным реализациям облачных сервисов, различным сетевым нагрузкам приложений, отражает особенности виртуализации и абстракции	Эффективность зависит от точности профилей обслуживания и спроса, текущий анализ для худшего случая производительности

Рассмотренные методы и виды мониторинга облачной среды могут быть применены при определении методов мониторинга ОИИС и воспроизведены при имитационном моделировании. Оценка производительности на основе измерений может применяться для сравнительной оценки производительности моделей ОИИС различного состава и топологии. Методы аналитической оценки могут быть реализованы в математических моделях ОИИС, а также применены для имитации тестовой рабочей нагрузки от физических датчиков и пользователей веб-портала – клиентов ОИИС, клиентских приложений, поставщиков физических датчиков и администраторов.

### Литература

1. Cloud monitoring guide. / URL:<https://docs.microsoft.com/en-us/azure/cloud-adoption-framework/manage/monitor/>(дата обращения 25.10.2019).
2. Гайдамако В.В. Инфраструктура Sensor-Cloud – облачные информационно-измерительные системы. // Проблемы автоматизации и управления – 2018. – №2 (35). С. 109–118.
3. URL:<https://www.motadata.com/ru/cloud-monitoring-all-you-need-to-know/> (дата обращения 25.10.2019)
4. Кочуков А. Какие существуют подходы для мониторинга в «облаке»? URL: <https://networkguru.ru/cloud-monitoring-part2/> (дата обращения 25.10.2019).
5. ManageEngine Applications Manager, URL: [https://www.manageengine.com/ru/applications\\_manager/](https://www.manageengine.com/ru/applications_manager/) (дата обращения 25.10.2019)
6. Zabbix URL: <https://www.zabbix.com/ru/>(дата обращения 25.10.2019).
7. Sysdig monitor. Container + Kubernetes monitoring, alerting, and troubleshooting. URL: <https://sysdig.com/products/monitor/> (дата обращения 25.10.2019)
8. RPTG Network Monitor URL: [https://www.ru.paessler.com/packet\\_loss\\_test](https://www.ru.paessler.com/packet_loss_test) (дата обращения 25.10.2019)
9. Prometheus URL: <https://prometheus.io/> (дата обращения 25.10.2019).
10. Production-Grade Container Orchestration URL: <https://kubernetes.io/> (дата обращения 25.10.2019).
11. Zenoss URL: <https://www.compuway.ru/monitoring/> (дата обращения 25.10.2019)

12. Network Detection & Response URL: <https://www.extrahop.com/> (дата обращения 25.10.2019).
13. Gigamon URL: <https://www.gigamon.com/>(дата обращения 25.10.2019).
14. Nubeva URL: <https://www.nubeva.com/> (дата обращения 25.10.2019).
15. CloudLens URL: <https://www.ixiacom.com/products/cloudlens> (дата обращения 25.10.2019).
16. EnvoyProxy URL: <https://www.envoyproxy.io/> (дата обращения 25.10.2019).
17. <https://www.onlanta.ru/press/media/it-weekly/16445/> (дата обращения 25.10.2019)
18. Z. Li, L. O'Brien, H. Zhang, R. Cai, On a catalogue of metrics for evaluating commercial cloud services, in: Proceedings of the 2012 ACM/IEEE 13th International Conference on Grid Computing, 2012, pp. 164–173.
19. Вопросы и ответы по Amazon EC2. URL: <https://aws.amazon.com/ru/ec2/faqs/> (дата обращения 25.10.2019)
20. QiangDuan, Cloud service performance evaluation: status, challenges, and opportunities – a survey from the system modeling perspective. // Digital Communications and Networks, Volume 3, Issue 2, May 2017, Pages 101-111. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352864816301456>, (дата обращения 25.10.2019)
21. Ворожцов А.С., Тугова Н.В., Тугов А.В. Оценка производительности облачных центров обработки данных. // Т-Сomm – Телекоммуникации и Транспорт, 2014. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/otsenka-proizvoditelnosti-oblachnyh-tsentrov-obrabotki-dannyh> (дата обращения 25.11.2019).
22. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Сетевое\\_исчисление](https://ru.wikipedia.org/wiki/Сетевое_исчисление) (дата обращения 25.10.2019)
23. J.L. Boudec, P. Thiran, Network Calculus: A Theory of Deterministic Systems for the Internet, Springer Verlag, Berlin, 2001.
24. R. Ghosh, F. Longo, V.K. Naik, K.S. Trivedi, Modeling and performance analysis of large scale IaaS Clouds, Future Gener. Comput. Syst. 29 (5) (2013) 1216–1234.
25. Замятина О. М. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации. Моделирование сетей, учебное пособие для магистратуры. – Москва : Издательство Юрайт, 2019. – 159 с. – (Университеты России). – ISBN 978-5-534-00335-2. – Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/433938> (дата обращения: 28.11.2019).
26. The GridSim Simulator. URL: <https://gridsim.hevs.ch/> (дата обращения 25.05.2019)
27. CloudSim: A Framework For Modeling And Simulation Of Cloud Computing Infrastructures And Services URL:<https://github.com/Cloudslab/cloudsim> (дата обращения: 28.11.2019).
28. GreenCloud – the green cloud simulator. URL:<https://greencloud.gforge.uni.lu/> (дата обращения 25.05.2019).
29. iCanCloud. URL:<http://icancloud.org/> (дата обращения 25.05.2019).
30. Simix. URL:<https://www.windriver.com/products/simix/> (дата обращения 25.05.2019)
31. SimGrid: Versatile Simulation of Distributed Systems/ URL:<https://simgrid.org/> (дата обращения 25.05.2019).

*Д. Авельцов,*

*Институт машиноведения и автоматизации НАН КР, Бишкек*

## **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВИРТУАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ С ПОМОЩЬЮ КОНТЕЙНЕРОВ**

В статье описаны методы виртуализации датчиков с применением docker контейнеров для предоставления датчиков как услуги клиентам облака, сети docker и примеры их использования. Приведены примеры создания docker образов и контейнеров с установкой виртуального датчика.

**Ключевые слова:** Виртуализация датчиков, docker, docker-контейнер, Infrastructure-as-a-Service, IaaS, сети docker, docker-compose, docker-swarm, reverse nginx проху

### **Введение**

Виртуализация датчиков – это метод, позволяющий нескольким клиентам работать в виртуальной среде и изолировать приложения(клиенты) от оборудования. Изоляция осуществляется промежуточным программным обеспечением, создающим несколько логических экземпляров физического сенсорного узла. Виртуализация датчиков используется в программно-аппаратных системах, основанных на архитектуре sensor-cloud [1].

**Общая архитектура системы.** Разрабатываемая система основывается на микросервисной архитектуре [2,3]. Микросервисная архитектура — вариант сервис-ориентированной архитектуры программного обеспечения, ориентированный на взаимодействие на сколько это возможно небольших, слабо связанных и легко изменяемых модулей – микросервисов [4].

Свойства, характерные для микросервисной архитектуры:

- модули можно легко заменить в любое время: акцент на простоту, независимость развертывания и обновления каждого из микросервисов;
- модули организованы вокруг функций: микросервис по возможности выполняет только одну достаточно элементарную функцию;
- модули могут быть реализованы с использованием различных языков программирования, фреймворков, связующего программного обеспечения, выполняться в различных средах контейнеризации, виртуализации, под управлением различных операционных систем на различных аппаратных платформах: приоритет отдаётся в пользу наибольшей эффективности для каждой конкретной функции, нежели стандартизации средств разработки и исполнения;
- архитектура симметричная, а не иерархическая: зависимости между микросервисами одноранговые.

Виртуализация датчиков (рис. 2) – это метод, позволяющий нескольким клиентам работать в виртуальной среде и изолировать приложения (клиенты) от оборудования. Изоляция осуществляется промежуточным программным обеспечением, создающим несколько логических экземпляров физического датчика.

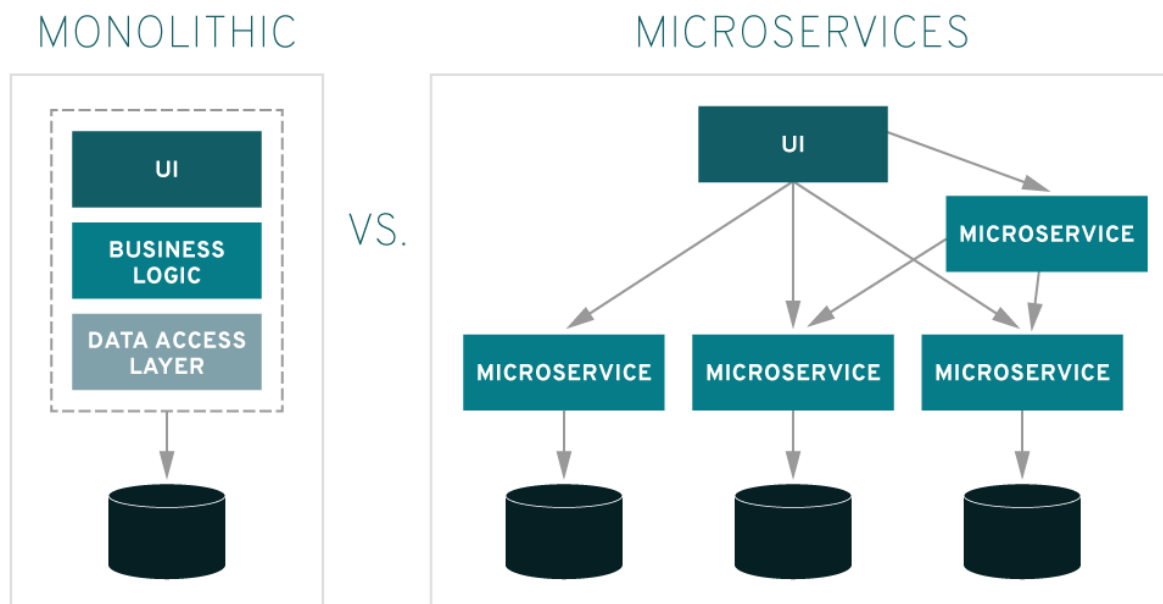


Рисунок 1 – Отличия микросервисного и монолитного архитектурного подхода в проектировании

Физические датчики проводят различные измерения (например, температуры, давления, освещенности, уровня вибрации, местоположения и т. п.), они оснащены миниатюрными вычислительными устройствами и средствами связи, работающими в заданном радиодиапазоне. Это позволяет устройству проводить измерения, самостоятельно проводить начальную обработку данных и поддерживать связь с внешней информационной системой. Такие датчики являются сенсорными узлами беспроводных сенсорных сетей (БСС) [5].

Виртуальный датчик является эмуляцией физического датчика, или программным представлением датчика, скрывающим аппаратный датчик. Виртуальные датчики обеспечивают представление сенсорных данных пользователю путем объединения данных от различных гетерогенных физических датчиков. На рисунке 3 показаны уровень физических датчиков и уровень виртуальных датчиков. Один физический датчик может быть представлен в нескольких виртуальных датчиках. Слой виртуальных датчиков лежит поверх узлов физических датчиков. Кроме того, он отделяет пользовательские приложения от физических датчиков.

Рассмотрим облако датчиков, которое предполагает их использование в качестве интерфейса между физической и цифровой средой. Облако датчиков позволяет использовать их в инфраструктуре путем виртуализации физического устройства в облаке, другими словами, предоставлять виртуальные датчики как сервис (SensIaaS, Sensing as a Service) [1]. Виртуальный датчик создается на серверах облака и предоставляется пользователю автоматически, также, как и другие облачные ресурсы: память, дисковое пространство, процессорное время, сетевая инфраструктура. Для этого в облаке должен быть подготовлен шаблон сервиса. Шаблоны предоставляются поставщиком датчиков и могут добавляться и удаляться из системы. Пользователь не имеет доступа к физическому датчику, вместо этого он может контролировать виртуальный датчик. Интеграция датчиков с облаком позволяет создать расширяемую и масштабируемую сеть. Метод виртуализации датчиков позволяет пользователю получать предпочтительную и точную информацию более эффективным способом из ограниченного числа датчиков. Кроме того, это помогает снизить энергопотребление и



стоимость развертывания и обслуживания всей сети. Виртуальные датчики имеют ряд преимуществ в таких случаях, как замена или обслуживание датчика. Виртуальный датчик непрерывно предоставляет данные пользователю, в то время как механизм сообщения с физическим датчиком является дискретным, что позволяет снизить энергозатраты батареи физического устройства. Кроме того, в случае сбоя физического датчика, либо потери связи с физическим датчиком, виртуальный датчик позволит продолжить обмен данными.

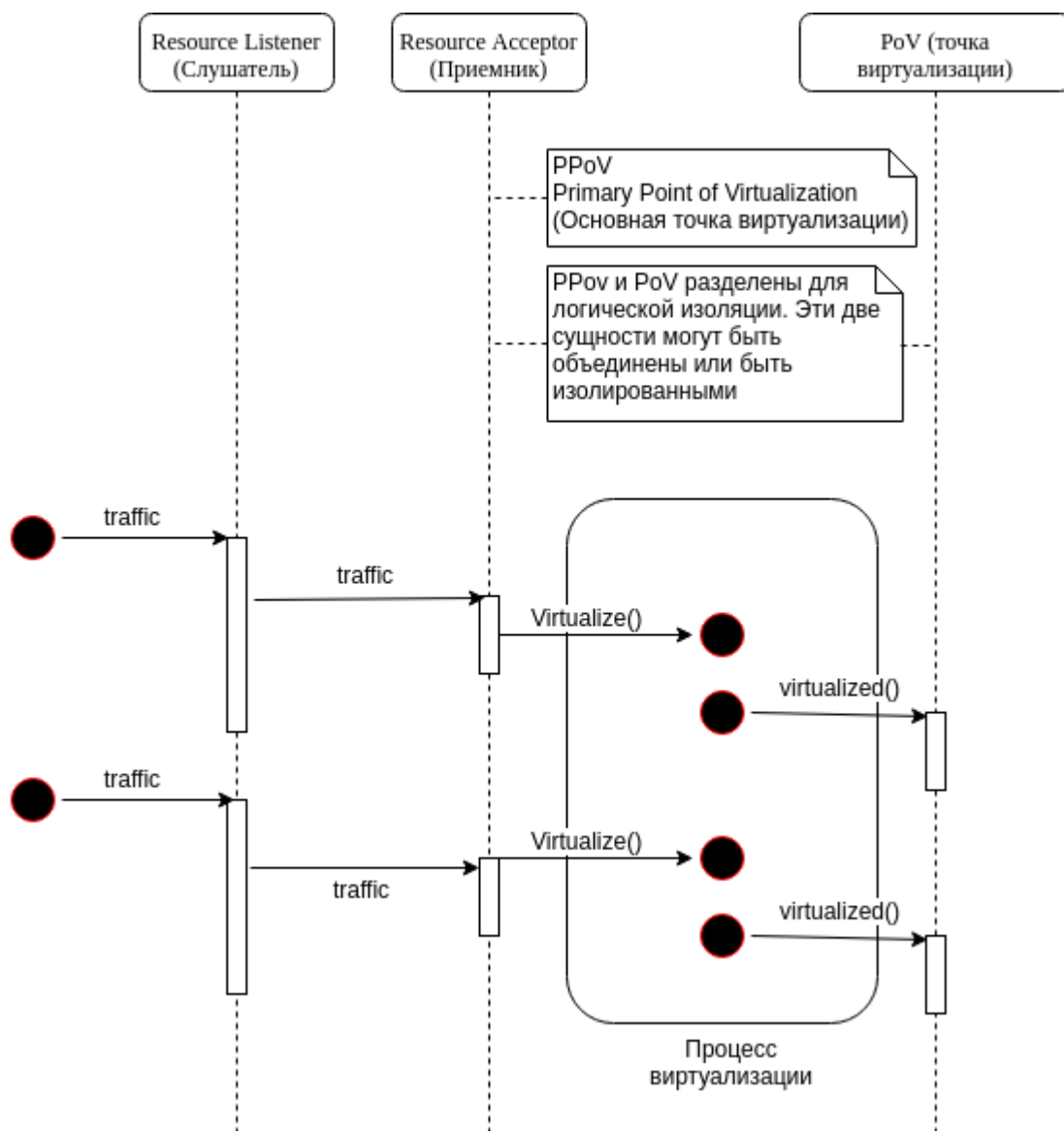


Рисунок 2 – Диаграмма последовательностей виртуализации датчиков

Инфраструктура как услуга (англ. Infrastructure-as-a-Service; IaaS) [1,6] – одна из моделей обслуживания в облачных вычислениях, по которой потребителям предоставляются по подписке фундаментальные информационно-технологические ресурсы – виртуальные серверы с заданной вычислительной мощностью, операционной системой (чаще всего предустановленной провайдером из шаблона) и доступом к сети. Platform as a Service (PaaS, «платформа как услуга») [1,6] – модель

предоставления облачных вычислений, при которой потребитель получает доступ к использованию информационно технологических платформ: операционных систем, систем управления базами данных, связующему программному обеспечению, средствам разработки и тестирования, размещенным у облачного провайдера. В этой модели вся информационно-технологическая инфраструктура, включая вычислительные сети, серверы, системы хранения, целиком управляется провайдером, провайдером же определяется набор доступных для потребителей видов платформ и набор управляемых параметров платформ, а потребителю предоставляется возможность использовать платформы, создавать их виртуальные экземпляры, устанавливать, разрабатывать, тестировать, эксплуатировать на них прикладное программное обеспечение, при этом динамически изменяя количество потребляемых вычислительных ресурсов.

*Виртуальный датчик.* Дано множество  $R$  физических датчиков  $\{r_i \mid \forall r_i \in R\}$ , каждый имеет тип  $\{\omega_i \mid \forall \omega_i \in \Omega\}$ , подмножество (узел)  $B \subset R$ , имеющее один или несколько физических датчиков, может быть размещено за интерфейсом виртуального сенсора  $v_i$ , на уровнях IaaS и PaaS следующим образом:

IaaS уровень

$$v_i \rightarrow \left\{ \begin{array}{ll} r_i & \text{singular ... (i)} \\ \{r_i \mid r_i \in B\} & \text{selector ... (ii)} \\ B & \text{accumulator ... (iii)} \\ h(B) & \text{aggregator ... (iv)} \\ \{r_i : \forall r_i \in B \rightarrow f(r_i)\} & \text{qualifier ... (v)} \\ \{r_i : \forall r_i \in B \rightarrow f(r_i, B)\} & \text{context qualifier ... (vi)} \end{array} \right.$$

PaaS уровень

$$v_i \rightarrow \left\{ \begin{array}{ll} p(r_i^T : \tau \in T) & \text{predicted ... (vii)} \\ c(B) & \text{computed ... (viii)} \end{array} \right.$$

Описание для всех типов виртуальных датчиков, указанных выше: (i) Singular (Сингулярные): Соотношение между физическим датчиком и виртуальным – один-к-одному. Для каждого датчика  $r_i \in B$ , создается виртуальный  $v_i$  датчик.

(ii) Selector (Селективные): Набор одинаковых физических датчиков представлен как один виртуальный датчик  $v_i$ . Виртуальный датчик получает данные от любого из физических датчиков группы, на основе алгоритма выбора. (соотношение многие-к-одному).

(iii) Accumulator (Аккумулярующие): Узел  $B$ , который содержит однородные или гетерогенные датчики и может быть представлен как один составной интерфейс предоставляемый виртуальным датчиком  $v_i$ . (соотношение многие-к-одному).

(iv) Aggregator (Агрегирующие): Агрегатная функция  $h$  применяется к считываемым данным, которые приходят со всех физических датчиков  $r_i$ :  $\forall r_i \in B$ , и возвращаемый результат агрегатной функции представлен, как виртуальный датчик  $v_i$ . (соотношение многие-к-одному).

(v) Qualifier (Квалифирующие): Виртуальный датчик  $v_i$  создается и выделяется соответствующему физическому датчику  $r_i$ , но данные с физического датчика доставляются, только если они отобраны с помощью квалификационной функции  $f$ .

(vi) Context Qualifier (Квалифицирующие по контексту): Как и (v) Qualifier (квалифицирующие), но квалификационная функция  $f$  получает данные с одного или более физических датчиков  $\{r_j | \forall r_j \in V \wedge r_j \neq r_i\}$  находящихся в узле  $B$ .

(vii) Predictor (Прогнозирующие): Виртуальный датчик  $v_i$  может содержать алгоритмом прогнозирования, который на основе анализа данных временных рядов на ранее считанные данные, может спрогнозировать возможные данные, которые будут получены от физического датчика, если этот датчик выйдет из строя.

(viii) Compute (вычисляющие): Виртуальный датчик  $v_i$  может содержать некоторые вычислительные алгоритмы, которые анализируют входящие данные от сенсорных узлов и преобразуют их.

Виртуализация сети основана на виртуальных датчиках и виртуальных каналах, которые позволяют нескольким сетям сосуществовать на одной физической платформе. Виртуальные сети могут быть сформированы подмножеством физической сети. Виртуализация сенсорной сети может являться взаимосвязью различных БСС. Она формируется подмножеством универсальных узлов сенсорной сети, при этом подмножество или группа сенсоров предназначены для выполнения определенных задач или способствуют выполнению определенного приложения в данный момент времени [7].

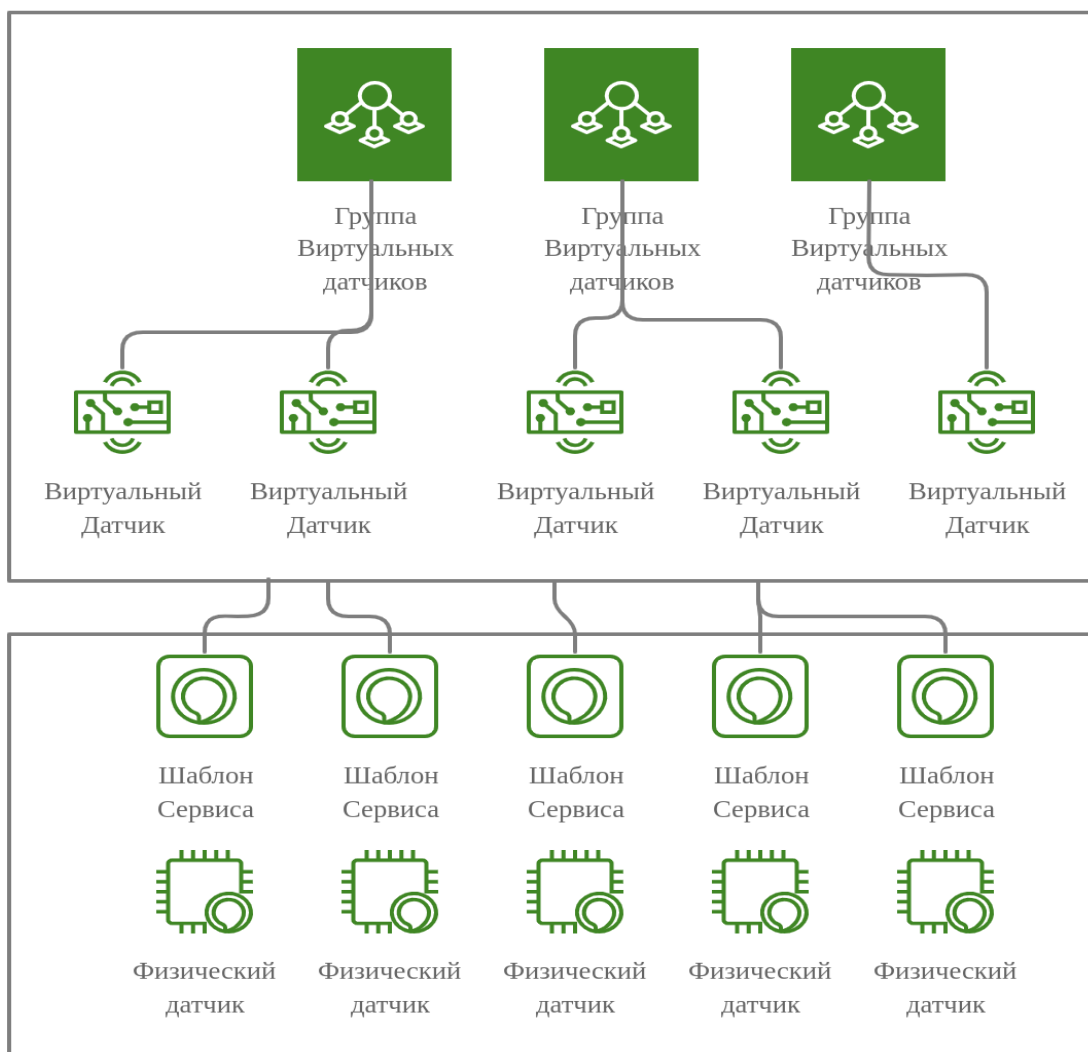


Рисунок 3 – Уровень физических датчиков и уровень виртуальных датчиков

**Подключение датчика к системе и создание шаблона.** Владелец физических датчиков подключает, физические датчики и регистрирует их в облачной системе, создает шаблоны датчиков (Рис. 4). Для создания шаблона датчика пользователю предоставляется веб-формы для указания формата передаваемых данных устройства [8,9] (Рис. 7).

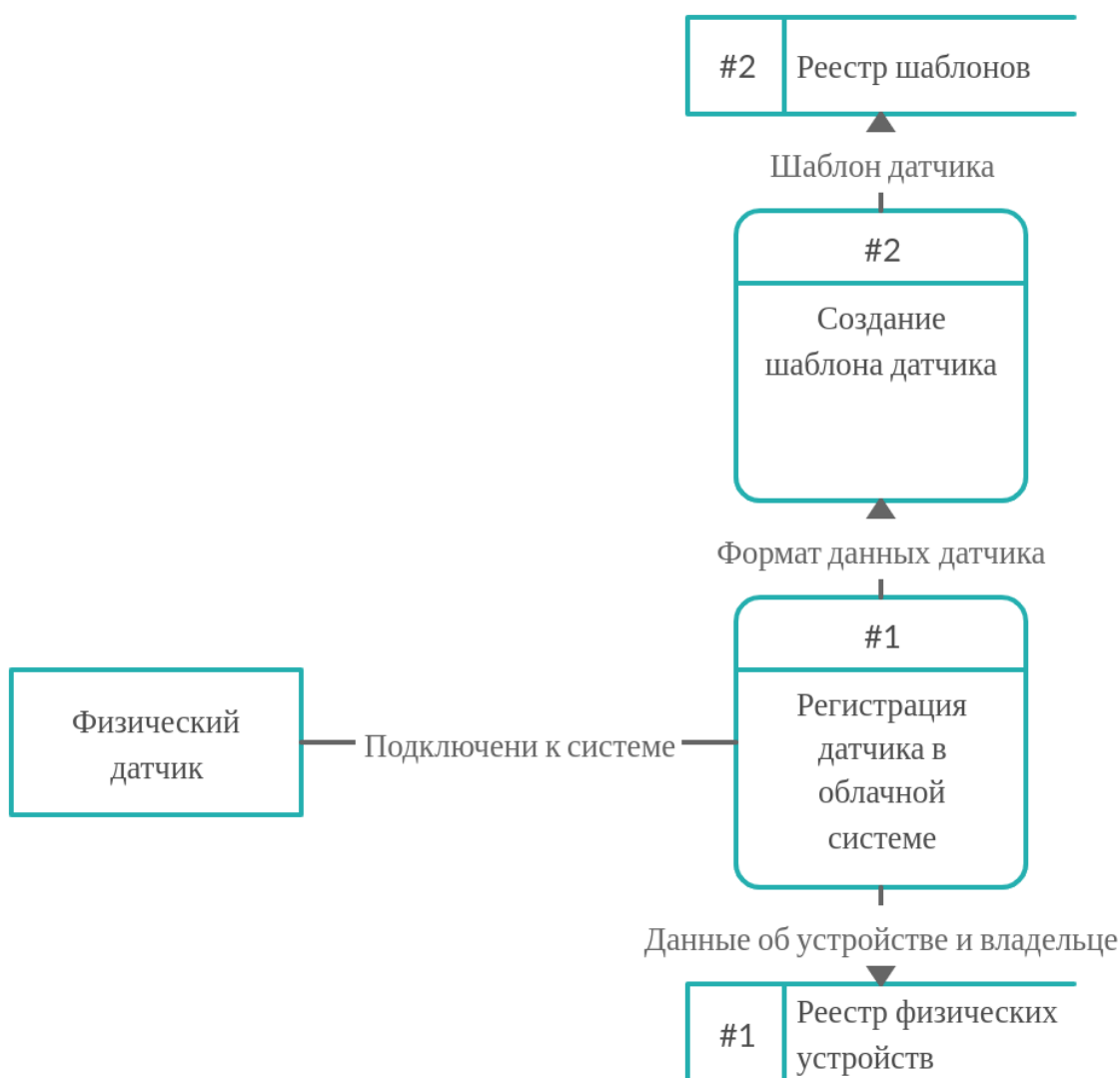


Рисунок 4 – Подключение датчика к системе и создание шаблона.

Главными действующими сущностями являются:

- Владелец физических датчиков (человек, частная или правительственная организация) – подключает, отключает физические датчики в своих БСС и регистрирует их в облачной системе, создает шаблоны датчиков, таким образом делая доступными для широкого использования данные своих датчиков (Рис. 5).
- Администратор/владелец инфраструктуры – управляет инфраструктурой облака, подключает и регистрирует другие ресурсы и создает шаблоны сервисов и датчиков. Шаблоны сервисов и датчиков хранятся в хранилище (каталоге) шаблонов (Рис. 5).
- Пользователи (люди, организации и приложения) – создают запросы на сервисы через Web-интерфейс и получают данные с физических датчиков [1] (Рис. 6).

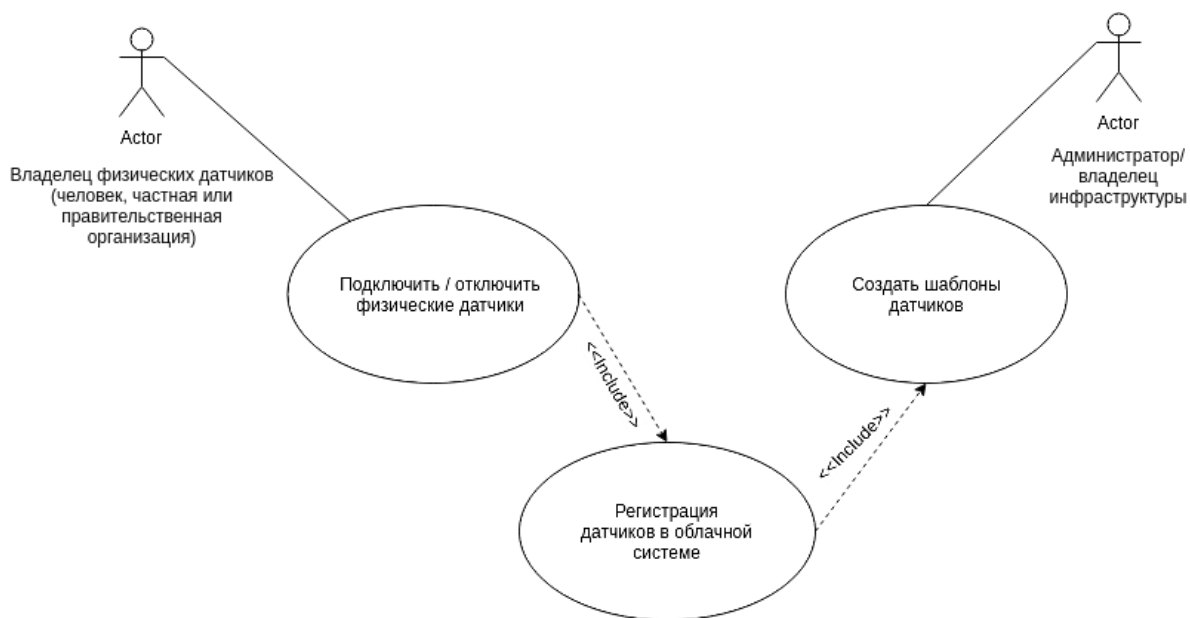


Рисунок 5 – Диаграмма вариантов использования для владельца физических датчиков и администратора инфраструктуры

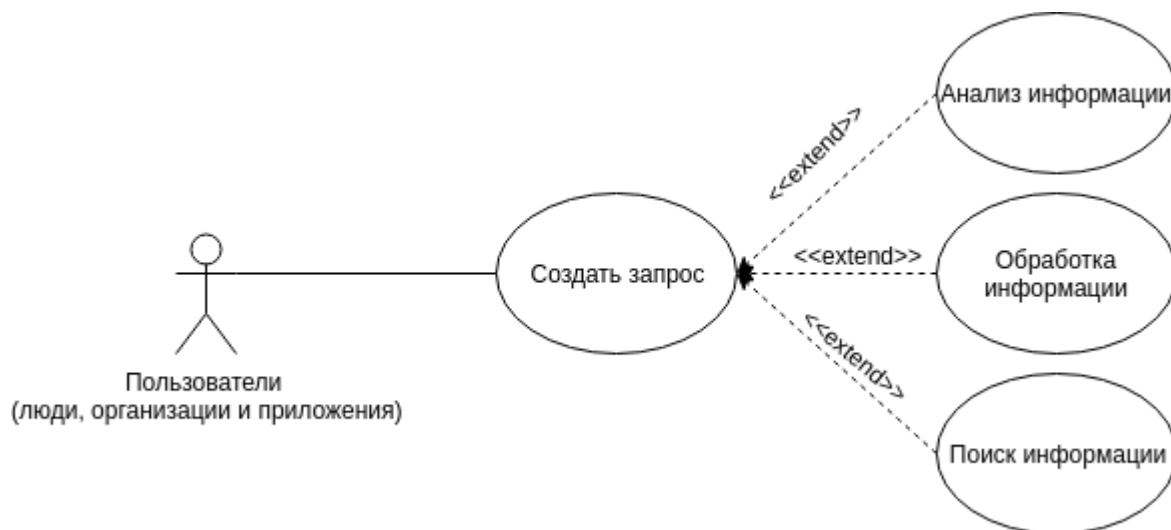


Рисунок 6 – Диаграмма вариантов использования для пользователей (люди, организации и приложения).

Создать датчик

Имя датчика

идентификатор устройства

идентификатор	название параметра	формат параметра
идентификатор	название параметра	формат параметра
идентификатор	название параметра	формат параметра
идентификатор	название параметра	формат параметра
идентификатор	название параметра	формат параметра
идентификатор	название параметра	формат параметра
идентификатор	название параметра	формат параметра

Создать шаблон

Рисунок 7 – Веб-форма создания шаблона датчика

**Сети Docker.** Для взаимодействия с внешним миром Docker применяет стек IP, используя TCP или UDP. Он поддерживает инфраструктуры адресации IPv4 и IPv6.

Сеть Docker построена на Container Network Model (CNM), которая позволяет создать свой сетевой драйвер. Таким образом, у контейнеров есть доступ к разным типам сетей и они могут подключаться к нескольким сетям одновременно [10]. Помимо различных сторонних сетевых драйверов, есть также встроенные драйверы:

- **Bridge:** в этой сети контейнеры запускаются по умолчанию. Связь устанавливается через bridge-интерфейс на хосте. У контейнеров, которые используют одинаковую сеть, есть своя собственная подсеть, и они могут передавать данные друг другу по умолчанию.
- **Host:** этот драйвер дает контейнеру доступ к собственному пространству хоста (контейнер будет видеть и использовать тот же интерфейс, что и хост).
- **macvlan:** Макvlan,- это сетевой драйвер, который позволяют назначать MAC-адрес контейнеру, делая его отображаемым как физическое устройство в вашей сети. Docker демон направляет трафик на контейнеры по их MAC-адресам. Использование macvlan драйвера иногда является лучшим выбором при работе с устаревшими приложениями, которые ожидают, что они будут напрямую подключены к физической сети.
- **overlay/overlay2:** Оверлей (Наложённая сеть), – это сетевой драйвер для соединения несколько демонов Docker между собой и которые позволяют docker-swarm

службам взаимодействовать друг с другом. Также возможно использовать оверлейные сети для облегчения связи между docker-swarm и автономным контейнером или между двумя отдельными контейнерами на разных Docker демонах. Эта стратегия устраняет необходимость выполнения маршрутизации на уровне ОС между этими контейнерами.

- none: означает отсутствие сетевого устройства – это сетевой драйвер, который позволяет отключать всю сеть для контейнеров. Обычно используется в сочетании с пользовательским сетевым драйвером.
- Network plugins: Дает возможность установить и использовать сторонние сетевые плагины с Docker контейнерами. Эти плагины доступны в Docker Store или у сторонних поставщиков услуг.
- Применение
- Мост (bridge) лучше всего использовать для связи нескольких контейнеров на одном и том же Docker хосте.
- Хост (host) сети лучше всего использовать, когда сетевой стек не должен быть изолирован от хоста Docker, но есть необходимость в том, чтобы другие аспекты контейнера были изолированы.
- Макvlan (macvlan) сети лучше всего использовать, когда требуется переход с выделенной VM на контейнеры или, требуется чтобы контейнеры выглядели как физические хосты в сети, каждый с уникальным MAC-адресом.

Пример создания overlay сети

```
$ docker network create -d overlay network-name  
c8668b3fc7f6ac9d8694a34d225327f9abb1d195c9757966919ed4adf9b35cea
```

Подключение контейнера к сети

```
$ docker network connect <network_name> <container_name>
```

Overlay-сети используются в контексте кластеров (Docker Swarm), где виртуальная сеть, которую используют контейнеры, связывает несколько физических хостов, на которых запущен Docker. Когда запускается контейнер на swarm-кластере (как часть сервиса), множество сетей присоединяется по умолчанию, и каждая из них соответствует разным требованиям связи.

**Создание контейнера с виртуальным датчиком в виде программного обеспечения.** Для адресации в качестве временного решения используется reverse nginx проxy сервер jwilder/nginx-proxy[11]. Пример настройки nginx-proxy-compose.yaml services:

```
nginx-proxy:  
  restart: always  
  image: jwilder/nginx-proxy  
  ports:  
    - "80:80"  
    - "443:443"  
  volumes:  
    - "/etc/nginx/vhost.d"  
    - "/usr/share/nginx/html"  
    - "/var/run/docker.sock:/tmp/docker.sock:ro"  
    - "/etc/nginx/certs"
```

```
letsencrypt-nginx-proxy-companion:
```

```
restart: always
image: jrcs/letsencrypt-nginx-proxy-companion
volumes:
  - "/var/run/docker.sock:/var/run/docker.sock:ro"
volumes_from:
  - "nginx-proxy"
```

Создание контейнеров `docker-compose -f nginx-proxy-compose.yaml up -d`

Пример вывода в консоль

```
Creating network "go-docker_default" with the default driver
Pulling nginx-proxy (jwilder/nginx-proxy):...
latest: Pulling from jwilder/nginx-proxy
a5a6f2f73cd8: Pull complete
2343eb083a4e: Pull complete
...
Digest:
sha256:619f390f49c62ece1f21dfa162fa5748e6ada15742e034fb86127e6f443b40bd
Status: Downloaded newer image for jwilder/nginx-proxy:latest
Pulling letsencrypt-nginx-proxy-companion (jrcs/letsencrypt-nginx-proxy-companion):...
latest: Pulling from jrcs/letsencrypt-nginx-proxy-companion
...
Creating go-docker_nginx-proxy_1 ... done
Creating go-docker_letsencrypt-nginx-proxy-companion_1 ... done
```

Пример образа контейнера с виртуальным сенсором внутри в качестве программного обеспечения

```
FROM golang:alpine AS build
RUN apk --no-cache add gcc g++ make git
WORKDIR /go/src/app
COPY . .
RUN go get ./...
RUN GOOS=linux go build -ldflags="-s -w" -o ./bin/sensor-app ./main.go

FROM alpine:3.10
RUN apk --no-cache add ca-certificates
WORKDIR /usr/bin
COPY --from=build /go/src/app/bin /go/bin
EXPOSE 80
ENTRYPOINT /go/bin/sensor-app --port 80
```

Пример настройки `docker-compose` файла [12] `go-sensor-compose.yaml` для виртуальных сенсоров

```
version: '2'
services:
  go-web-app:
    restart: always
    build:
      dockerfile: Dockerfile
      context: .
```

Создание контейнера [13] `docker-compose -f go-sensor-compose.yaml up -d`



Вывод на экран

Creating network "go-docker\_default" with the default driver

Building go-sensor-app

Step 1/12 : FROM golang:alpine AS build

----> b97a72b8e97d

...

Successfully tagged go-docker\_go-sensor-app:latest

WARNING: Image for service go-sensor-app was built because it did not already exist.

To rebuild this image you must use `docker-compose build` or `docker-compose up --build`.

Creating go-docker\_go-sensor-app\_1 ... done

**Организация структуры данных реестра датчиков.** Структура базы данных разработана таким образом, чтобы избежать дублирования данных, обеспечить максимальную скорость доступа к ним, а также максимально облегчить программирование операций обращения к базе данных (Рис. 8).

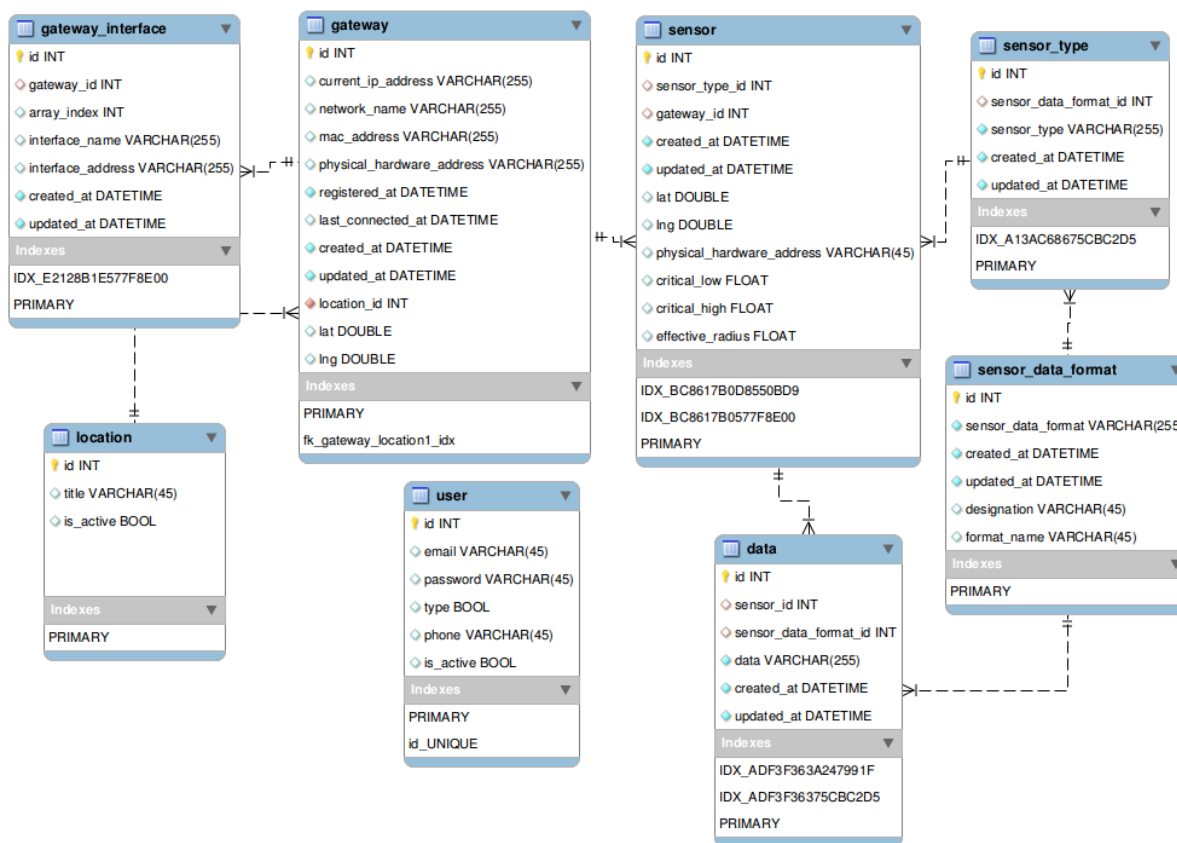


Рисунок 8 – Схема базы данных (бета версия)

### Заключение

Данная статья является первой из серии статей о разработке программной системы виртуализации датчиков. Виртуализация измерительных устройств решает несколько проблем – снижает энергопотребление измерительных устройств путем дискретизации соединения между виртуальной копией устройства и его физическим представлением; масштабируемость устройства на необходимое количество пользователей; администрирование устройств и групп устройств; описание формата датчика, и его данных (шаблон датчика). Виртуальные датчики являются главным сервисом, предоставляемым облачными информационно-измерительными системами.

**Литература**

1. Гайдамако В.В. Инфраструктура SENSOR-CLOUD – облачные информационно-измерительные системы // Проблемы автоматизации и управления. – 2018. – № 2 (35). С. 109–118
2. Richardson, C. (2019). “What are microservices?” Retrieved from <https://microservices.io/>. (дата обращения 03.12.2019).
3. Chris Richardson of Eventuate, Inc. May 19, 2015. “Introduction to Microservices”. <https://www.nginx.com/blog/introduction-to-microservices/> (дата обращения 03.12.2019).
4. Fowler, M. (2014, March 25). “Microservices: a definition of this new architectural term.” Retrieved from <https://martinfowler.com/articles/microservices.html>. (дата обращения 03.12.2019).
5. Imran Khan, Student Member, IEEE, Fatna Belqasmi, Member, IEEE, Roch Glitho, Senior Member, IEEE, Noel Crespi, Senior Member, IEEE, Monique Morrow and Paul Polakos - Wireless Sensor Network Virtualization: A Survey.
6. Khan, I.; Errounda, F.Z.; Yangui, S.; Glitho, R.; Crespi, N., – Getting Virtualized Wireless Sensor Networks’ IaaS Ready for PaaS / Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), 2015 International Conference.
7. Zubair Khalid, Norsheila Fisal and Mohd. Rozaini – A Survey of Middleware for Sensor and Network Virtualization / 2014 UTM-MIMOS Centre of Excellence in Telecommunication Technology.
8. Sanem Kabadayi, Adam Pridgen, and Christine Julien The Center for Excellence in Distributed Global Environments The Department of Electrical and Computer Engineering The University of Texas at Austin – Virtual Sensors: Abstracting Data from Physical Sensors
9. Sanem Kabadayi and Christine Julien The Center for Excellence in Distributed Global Environments The Department of Electrical and Computer Engineering The University of Texas at Austin – Remotely Deployed Virtual Sensors
10. <https://docs.docker.com/v17.09/engine/userguide/networking/> (дата обращения 05.12.2019).
11. <https://github.com/jwilder/nginx-proxy> (дата обращения 05.12.2019).
12. <https://docs.docker.com/compose/> (дата обращения 05.12.2019).
13. <https://docs.docker.com/engine/reference/commandline/container/> (дата обращения 05.12.2019).

**Ж. Ш. Шариеналиев**, [avtomatika\\_nankr@mail.ru](mailto:avtomatika_nankr@mail.ru)  
Институт машиноведения и автоматизации НАН КР,  
**Ш.А. Мирзакулова**, [mirzakulova@mail.ru](mailto:mirzakulova@mail.ru),  
**С.У. Исакова.**, [Sabira49@mail.ru](mailto:Sabira49@mail.ru)

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СЕТЕВОГО ТРАФИКА

Современная гетерогенная сеть порождает сетевой трафик со сложной (неоднородной) структурой. Исследование реально измеренных данных показывают, что они обладают не равномерной интенсивностью поступления пакетов на обслуживаемые сетевые устройства. При этом модели, построенные на основе данных, характеризующего один объект за ряд последовательных моментов времени (временные ряды) обладают свойством нестационарности, что означает, что их структура многокомпонентная. Поэтому сегодня задачи управления сетью основываются, в том числе и на предсказанных будущих данных для принятия правильного решения. Выявить и количественно выразить компоненты сложной структуры – наличие/отсутствие тенденции, периодичности, случайной компоненты является основной задачей анализа временного ряда. Идентифицировать нелинейную функцию и осуществить его прогнозирование с большим успехом сегодня осуществляют алгоритмы нейронной сети с глубоким обучением.

**Ключевые слова:** временной ряд, нейронная сеть, перцептрон, многослойная сеть, прогноз

### Введение

Проведенные исследования временного ряда сгенерированного в мульти-сервисной пакетной сети показали неравномерную интенсивность количества пакетов, то есть ряд оказался нестационарным. Для прогнозирования таких рядов классические методы прогнозирования не пригодны.

Нелинейную идентификацию с прогнозированием возможно с использованием нейросетевого прогнозирования. При этом нейронные сети и глубокое обучение хорошо справляются с подобными задачами.

Еще в 1943 г. была написана статья нейрофизиологом Уорреном МакКаллохом и математиком Уолтером Питтсом о том, как могут работать нейроны в мозге. Они показали, что с помощью пороговых нейронных элементов можно реализовать исчисление логических функций для распознавания образов. Была смоделирована простая нейронная сеть с использованием электрической цепи. В 1949 г. Дональдом Хеббом было предложено правило обучения. При этом было отмечено, что нейронные пути усиливаются при каждом их использовании. По его словам, если два нерва срабатывают одновременно, связь между ними усиливается. В 1950 г. стало возможным на компьютерах осуществлять моделирование гипотетической нейронной сети (сотрудник лаборатории ИВМ Натаниал Рочестер). Далее были разработаны распознавание двоичных шаблонов, адаптивный фильтр, устраняющий эхо на телефонных линиях. В 1962 г. Фрэнк Розенблатт предложил свою модель нейронной сети – перцептрон, что послужило крупным толчком в развитии нейрокибернетики. Эта модель основана на идее, что хотя бы один активный перцептрон может иметь большую ошибку, то можно отрегулировать значения веса с целью распределения его по сети или, по крайней мере, для соседних перцептронов и получить предсказанное значение. В 1962 г. Widrow & Hoff разработали процедуру обучения, а в 1975 г. создана первая многослойная сеть, далее разработана сеть Хопфилда и т.д. В 80-е XX века

появляются термины «нейрокибернетика», «нейроинформатика», «нейрокомпьютеры». Именно доктор Роберт Хехт-Нильсен дал определение нейронной сети, которую называл искусственной нейронной сетью (ИНС) и изобрел один из первых нейрокомпьютеров. Следовательно, нейронная сеть представляет собой серию алгоритмов, которые стремятся распознать основные взаимосвязи в наборе данных посредством процесса, который имитирует работу человеческого мозга. В этом смысле нейронные сети относятся к системам нейронов, как органических, так и искусственных по своей природе. Нейронные сети могут адаптироваться к изменению ввода; таким образом, сеть генерирует наилучший возможный результат без необходимости пересмотра критериев вывода. Концепция нейронных сетей, которая имеет свои корни в искусственном интеллекте, быстро набирает популярность и используется в различных областях.

### **Выбор метода прогнозирования нестационарного ряда и программной оболочки**

К основным методам прогнозирования нестационарного временного ряда относятся:

- статистические методы;
- новые методы на основе искусственного интеллекта (ИИ).

Среди статистических подходов метод ARIMA (Auto-Regressive Integrated Moving Average) позволяет описывать нестационарные временные ряды, которые сводятся к стационарным рядам взятием разностей некоторого порядка от исходного временного ряда.

К новым методам на основе ИИ относятся:

- ИНС – искусственные нейронные сети;
- ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) – адаптивная сеть на основе системы нечеткого вывода;
- Fuzzy Logic – нечеткая логика;
- SVM (Support Vector Machine) – метод опорных векторов;
- Neuro-Fuzzy Network - нейро-нечеткие сети;
- Evolutionary Optimization Algorithm - эволюционные алгоритмы оптимизации.

Нейронные сети состоят из простых элементов функционирующих параллельно. Название этих элементов пришло из биологических нервных систем. Как и в природе, связи между элементами четко определены функцией сети.

Возможности нейронных искусственных сетей успешно применяются для решения задач классификации, прогнозирования и управления, обеспечивая предельное распараллеливание алгоритмов, соответствующих нейросетевой технологии обработки данных.

Алгоритм обратного распространения (Back propagation) – это контролируемый алгоритм обучения, предназначенный для обучения многослойных перцептронов (ИНС), который способен создавать полезные новые функции, что отличает этот алгоритм от более ранних, более простых алгоритмов. При этом суть многослойности перцептрона заключается в том, что метод обратного распространения ошибки учит все слои, а не, потому что перцептрон имеет несколько слоев. Обратное распространение – это сущность обучения нейронной сети. Это практика точной настройки весов нейронной сети на основе частоты ошибок (то есть потерь), полученных в предыдущей эпохе (то есть итерации). Правильная настройка весов обеспечивает более низкий уровень ошибок, что делает модель надежной за счет увеличения ее обобщения.

Под обучением понимают адаптацию сети к предъявляемым эталонным образцам с помощью изменения весовых коэффициентов связей между нейронами (рис. 1).

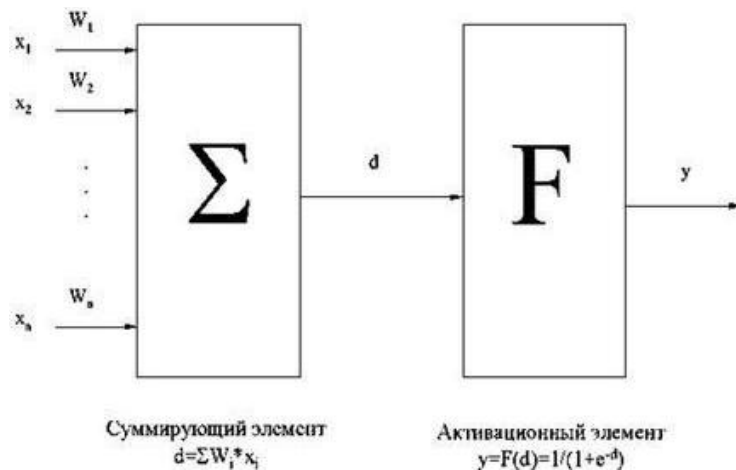


Рисунок 1 – Искусственный нейрон

Послойная организация нейронов копирует слоистые структуры определенных отделов мозга [1]. Многослойная нейронная сеть способна осуществлять любое отражение входных векторов в выходные.

Обучение нейронной сети может вестись с учителем (представляются значения, как входных данных, так и желательных выходных сигналов, и она по некоторому алгоритму осуществляется подстройка веса своих синаптических связей) и без учителя (веса изменяются по алгоритму, учитывающие только входные и производные от них сигналы). Нейронная сеть, обучаемая с учителем – многослойная и пригодна для решения задачи нелинейной авторегрессии.

Для осуществления прогнозирования нестационарного временного ряда выбран пакет прикладных программ (ППП) фирмы Math Works Neural Network Toolbox (NNT), который функционирует под управлением ядра системы Matlab.

В пакете NNT встроены следующие обучающиеся функции:

- trainidx – МОРО с импульсом и адаптацией;
- trainedp – сопряженных градиентов (Поллака-Рибейры);
- trainlm – метод Левенберга-Марквардта.

Точность прогнозирования зависит от ее архитектуры, то есть от числа скрытых слоев и числа нейронов в каждом слое. У перцептрона, который имеет много слоев вычислительная способность более высока и он хорошо описывают многомерные зависимости с большой степенью нелинейности, чем перцептрон с одним слоем.

К преимуществам ППП NNT можно отнести – большое количество различных моделей и методов прогнозирования временного ряда, создания и использования многослойных перцептронов и др.

### Прогнозирование нестационарного ряда в программной среде Matlab

Измеренный ряд динамики приведен на рисунке 2, который отображает совокупность переданных по магистральной сети пакетов за пять часов за каждые 10 с.

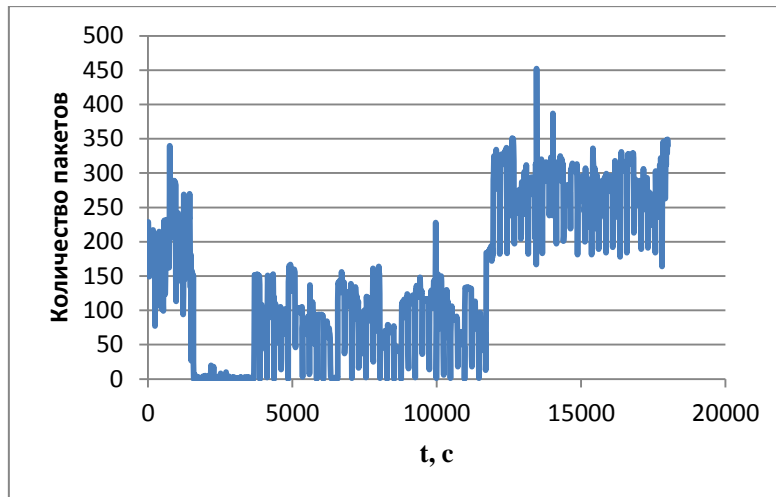


Рисунок 2 – Ряд интенсивности передачи пакетов

Для осуществления прогнозирования сетевого трафика воспользуемся ИНС. Для обучения был представлен временной ряд интенсивности передачи пакетов. Выходные – прогнозные данные. Была использована сеть с пятью слоями, в том числе в ней имеется четыре скрытых слоя. Первый скрытый слой связан со вторым, второй связан с третьим и третий – с четвертым. Первый скрытый слой содержит 50 нейронов, второй – 20, третий – 20, четвертый – 20, пятый – 1 (рис. 3).

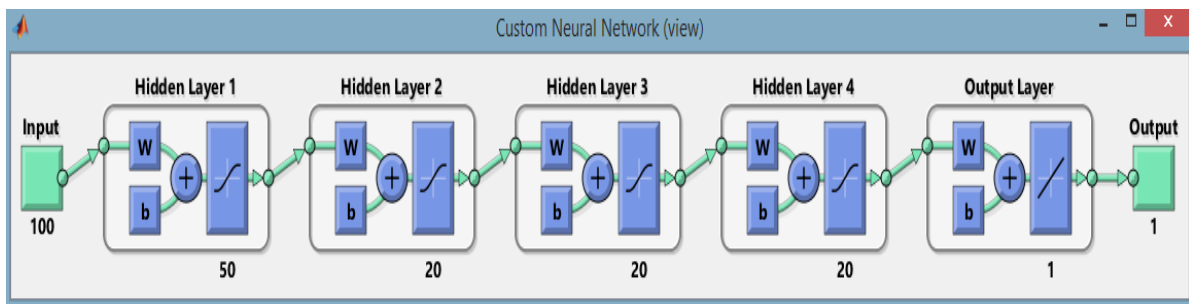


Рисунок 3 – Структура ИНС

В результате запуска и обучения ИНС получены информативные графики:

- Train, описывающий параметры настройки обучения. При этом значение эпохи (цикл) равно 1, что показывает сеть, представлена вводом нового шаблона корректировки (обратное распространение ошибки) вкупе с прямым потоком активации произошли под корректировки весов ИНС с итоговой среднеквадратичной погрешностью. Дальнейшее увеличение значения эпохи приводит к уменьшению значения средней квадратичной ошибки MSE, то есть тренировка продолжалась 4 эпохи;

- Validation – исследуемые данные после значения эпохи равного 1 не изменяет своих значений, то есть лучшая производительность берется из эпохи с наименьшей ошибкой валидации (точка обведенная кружочком);

- Test – показывает наилучшую производительность обучения;

- Best - лучшая производительность.

График обучения представлен на рис. 4, на котором видно, что наименьшая ошибка валидации равна 0,0053042.

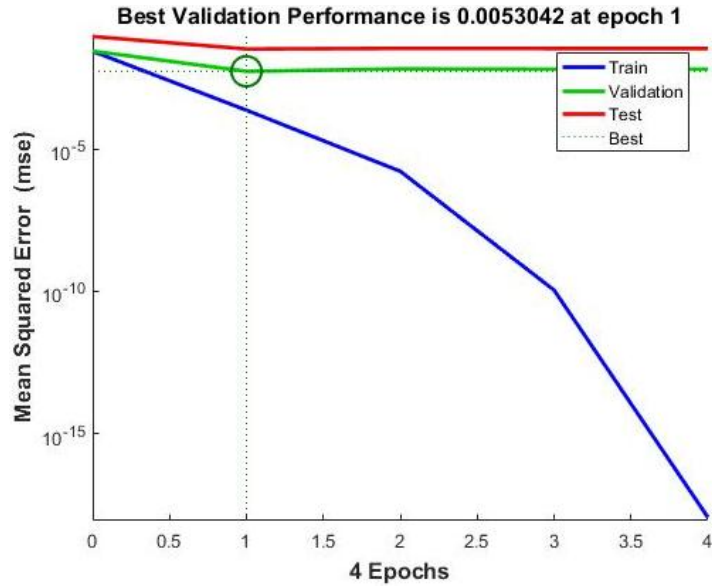


Рисунок 4 – График обучения

На рис. 5 показаны инструменты обучения ИНС, дополнительно отображающие различные параметры прогресса прогнозирования.

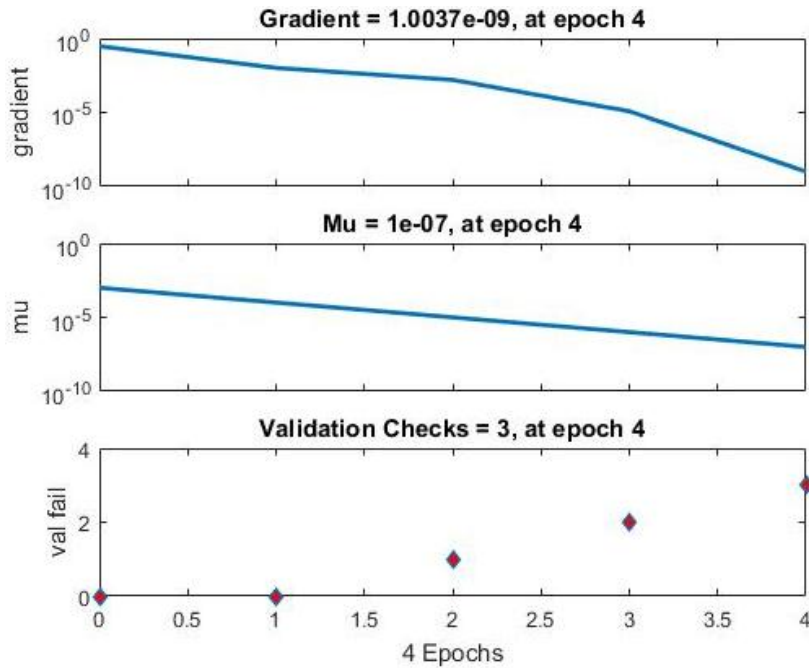


Рисунок 4 – Инструменты обучения ИНС

На рис. 5 показаны два графика данные обучения и проверки, на которых пунктирная линия на каждом графике представляет идеальный результат. Сплошная линия на графике представляет собой наилучшую линейную регрессию между результатами и целями. Значение R является показателем взаимосвязи между выходами и целями. Результаты обучения и испытаний показывают большие значения параметра R.

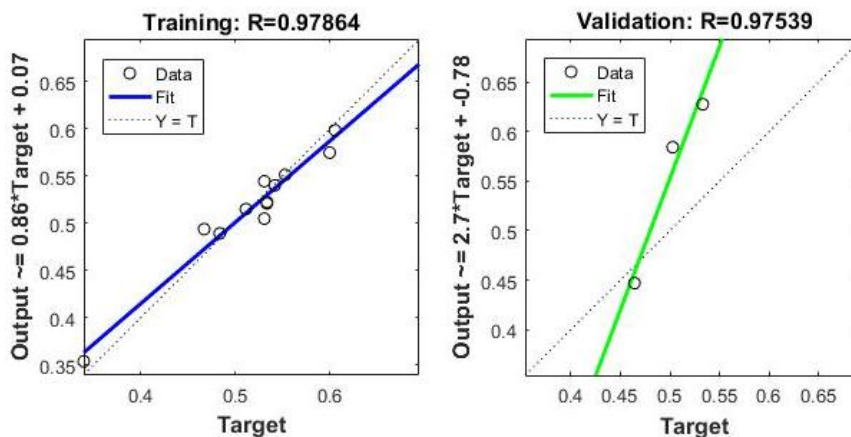


Рисунок 5 – Графики аппроксимации обучения и проверки

На рис. 6 приведен график прогноза интенсивности пакетов до уровня 2300.

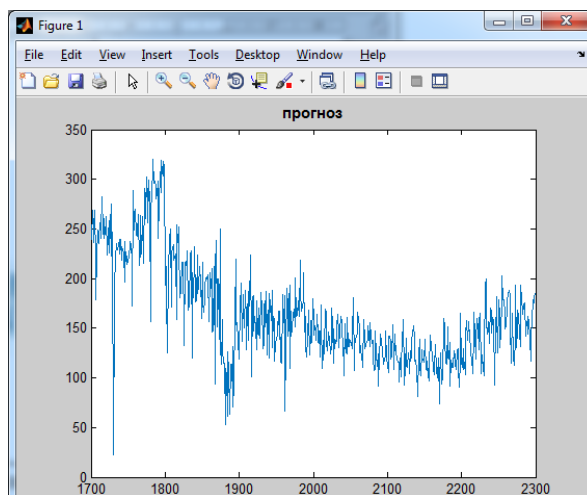


Рисунок 6 – Прогноз интенсивности пакетов

**Заключение.** Задача прогнозирования интенсивности трафика была решена при помощи ИНС. При этом получены: наименьшая ошибка валидации, равная 0,0053042, наилучшая аппроксимация ряда с высокими значениями параметра R.

### Литература

1. Николаева С.Г. Нейронные сети. Реализация в Matlab. Учебное пособие. Нейронные сети. Реализация в Matlab: учебное пособие / С.Г. Николаева. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2015. – 92 с.
2. Исакова С.У., Мирзакулова Ш.А. Статистическая оценка основных тенденций измеренного временного ряда. – Вестник КРСУ, 2018. – Том 18. – №12. –С. 51–54.
3. Шаршеналиев Ж.Ш., Мирзакулова Ш.А., Юсупова Г.М. Оценка спектра мощности временного ряда // Материалы научной конференции ИИВТ КН МОН РК «Инновационные IT и Smart-технологии» – Алматы, 03. 2019. – С. 332–337.
4. Сериков Т.Ф., Мирзакулова Ш.А., Юсупова Г.М., Авелбекова С.Ш., Сабитова А.Ж. Анализ временного ряда методом ССА // Вестник ПГУ, 2019. – № 3 – С. 328–339.



*А.К. Кожоголова, [altynaikozhogulova@gmail.com](mailto:altynaikozhogulova@gmail.com)*

*ЗАО "Альфа-Телеком", Кыргызстан, Бишкек*

*аспирант Института машиноведения и автоматизации НАН КР*

## **РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ УСТАЛОСТИ ВОДИТЕЛЕЙ**

В статье рассмотрены возможности создания системы оценки усталости на основе выбранной модели для мобильных устройств, приведен пример разработки интеллектуального мобильного приложения на базе экспертной системы, представлен прототип пользовательского интерфейса будущей системы.

**Ключевые слова:** Android-приложение, интеллектуальные системы, фреймы, мобильные экспертные системы, разработка приложения для мобильной системы.

**Введение.** Разработка интеллектуальных систем для измерения, диагностики и прогнозирования состояния различных исследуемых объектов является в наши дни наиболее актуальной. Рост вычислительной мощности мобильных устройств и современные облачные сервисы создают возможности для реализации интеллектуальных систем в качестве мобильных приложений, позволяющих сохранять в облаке информацию, и выдавать решения на основе анализа множества имеющихся параметров. В настоящее время интенсивно развиваются медицинские приложения интеллектуальных систем, реализуемые как на основе технологий разработки экспертных систем, так и нейросетевых технологий. Их внедрение в виде мобильных решений в сферу здравоохранения способствовало развитию одной из самых перспективных отраслей в области развития компьютерных медицинских технологий – мобильного здравоохранения, или Mobile Health (mHealth). Принцип mHealth заключается в оценке физического состояния пользователя, диагностике различных заболеваний на основе множества параметров и выдаче соответствующих рекомендаций [1, 2].

Как известно, экспертные системы (ЭС) создаются на основе существующих знаний о предметной области. Реализация ЭС становится возможной в связи с тем, что для платформ iOS и Android создано большое количество приложений, позволяющих подключать различные дополнительные устройства и датчики, которые превращают обычный смартфон в медицинский прибор (например, снять ЭКГ, измерить давление и т.п.) [2].

Кроме сугубо медицинских интеллектуальных систем, в настоящее время разрабатываются мобильные решения для оценки состояния людей, занятых в сферах деятельности повышенного риска. Такие системы помогут пользователям, например водителям, оценивать свое состояние и предупреждать различные риски возникновения нежелательных последствий. Существующие решения по разработкам систем контроля состояния и оценке усталости водителей в основном аппаратно-ориентированы. Например, приложение DriveAwake французских разработчиков, которое работает под ОС IOS и предназначено для контроля усталости водителя во время движения автомобиля. Это приложение оценивает общее состояние водителя посредством сканирования глаз водителя и оценки скорости реакции на определенные визуальные сигналы, к не-

достаткам приложения следует отнести периодически возникающую неточность в оценке состояния пользователя, поскольку фронтальная камера смартфона не всегда может определить глаза водителя, а также возникающее вследствие этого ложное срабатывание сигнала пробуждения. Для контроля усталости водителя в настоящее время активно внедряются и используются встраиваемые в автомобиль системы мониторинга. Такие системы, как правило, делятся на две категории: системы, контролирующие движения водителя, и системы, контролирующие движения автомобиля [12]. Фирма Mercedes-Benz создала систему Attension Assist, которая включает в себя контроль водителя на основе его поведения за рулем, манеры управления, условиях движения и т.д. В частности, существуют системы, отслеживающие силу и частоту нажатия педали водителем. Компании Ford и Toyota разрабатывают системы мониторинга сердечно-сосудистой системы водителя и вывода диаграммы ЭКГ на монитор навигационной системы автомобиля. Снятие ЭКГ происходит с помощью специального датчика, расположенного на руле или сиденье, или при помощи дистанционных устройств. Технология, разработанная компанией Caterpillar, предназначена для отслеживания движения и поведения глаза водителя, включая частоту моргания и размер зрачков. Контроль осуществляется с помощью специальной инфракрасной камеры, которая обладает возможностью анализа в полной темноте или сквозь очки. В случае необходимости, система включает вибрацию сидения или звуковую сигнализацию. Японские производители используют другой способ определения усталости водителя. Для контроля усталости используются специальные камеры, отслеживающие жесты и мимику водителя. При отклонениях психоэмоциональных показателей [7], таких как закрытие глаз, срабатывает специальный сигнал предупреждения.

Достоинствами рассмотренных систем контроля усталости являются возможность непрерывного контроля усталости водителя во время движения, возможность точного замера показателей водителя, возможность учета внешних условий. Но такого рода системы обладают и недостатками. Во-первых, выявлены случаи ложного срабатывания системы, что приводит к эмоциональному напряжению водителя. Во-вторых, системы обрабатывают данные лишь по одному или двум параметрам или показателям, что снижает точность определения усталости.

Целью настоящей работы является разработка интеллектуальной мобильной системы оценки состояния водителей, как наиболее подверженных риску повышенной усталости. Для тестирования приложения были выбраны разновозрастные группы людей, занятых вождением транспортных средств:

**Постановка задачи.** В рамках данной работы на основе анализа существующих решений по оценке состояния водителей были поставлены задачи:

- разработать Android-приложение для мобильного устройства на основе множества параметров с применением клиент-серверной архитектуры;
- разработать Android Wear - приложение для смарт-часов с возможностью снятия физических показателей пользователя, а также с возможностью передачи данных на мобильное устройство и определить протокол передачи данных между мобильным устройством и смарт-часами;
- использовать облачный сервер для хранения знаний и данных и разработать сервер-приложение для взаимодействия мобильного приложения с облачным хранилищем;
- разработать базу знаний, содержащую факты и знания об усталости на примере водителей; разработать базу данных, хранящую информацию о пользователях и их состоянии.

**Методы решения.** Для решения поставленных задач были использованы методы и алгоритмы проектирования экспертных систем[8]. Эффективность применения той

или иной модели и алгоритма ее обучения зависит от типа решаемой задачи, объема обучающих данных, а также используемых вычислительных ресурсов. Для оценки усталости водителей используются данные разного типа, по результатам анализа которых диагностируется степень усталости, из чего следует, что поставленную задачу следует относить к частному случаю задач классификации.

Нами использованы методы и алгоритмы разработки объектно-ориентированного программирования.

**Предлагаемое решение.** Для разработки мобильного приложения оценки усталости были использованы следующие программные средства:

- Фреймворк Xamarin[4];
- Интегрированная среда разработки Visual Studio 2015;
- Язык разметки xml, axml;
- Язык программирования C#;
- Azure Mobile Apps –служба мобильных приложений[3];
- SQLite – СУБД для мобильных приложений.

Таким образом, была сформирована структура мобильной системы для оценки состояния водителей, которая состоит из указанных выше в постановке задачи компонентов элементов (рис. 1):

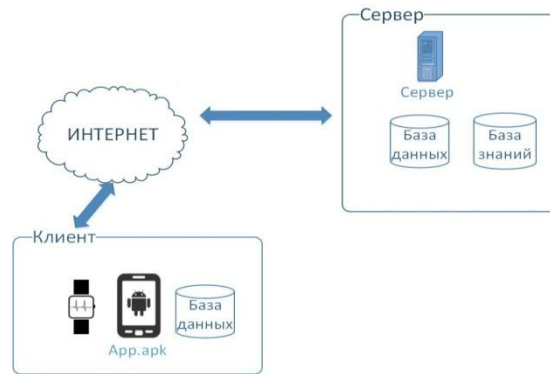


Рисунок 1. Структура клиент-серверного приложения.

На рисунке 2 показаны варианты использования предлагаемого мобильного приложения оценки усталости водителя.



Рисунок 2 – Диаграмма вариантов использования мобильного приложения

Работа приложения начинается синхронизацией данных с приложением для смарт-часов. По выбору пользователя открывается тест для оценки состояния водителя. Из базы знаний извлекаются факты. По окончании теста осуществляется оценка усталости пользователя, согласно имеющимся знаниям. Мобильное приложение генерирует соответствующую результату тестирования экспертную рекомендацию для водителя. Далее данные, полученные со смарт-часов, и результаты тестирования заносятся в локальную и удаленную базы данных.

Сервер для передачи данных между мобильным приложением и базой данных, размещенной в облачном сервисе Azure, состоит из следующих пакетов (рис. 3):

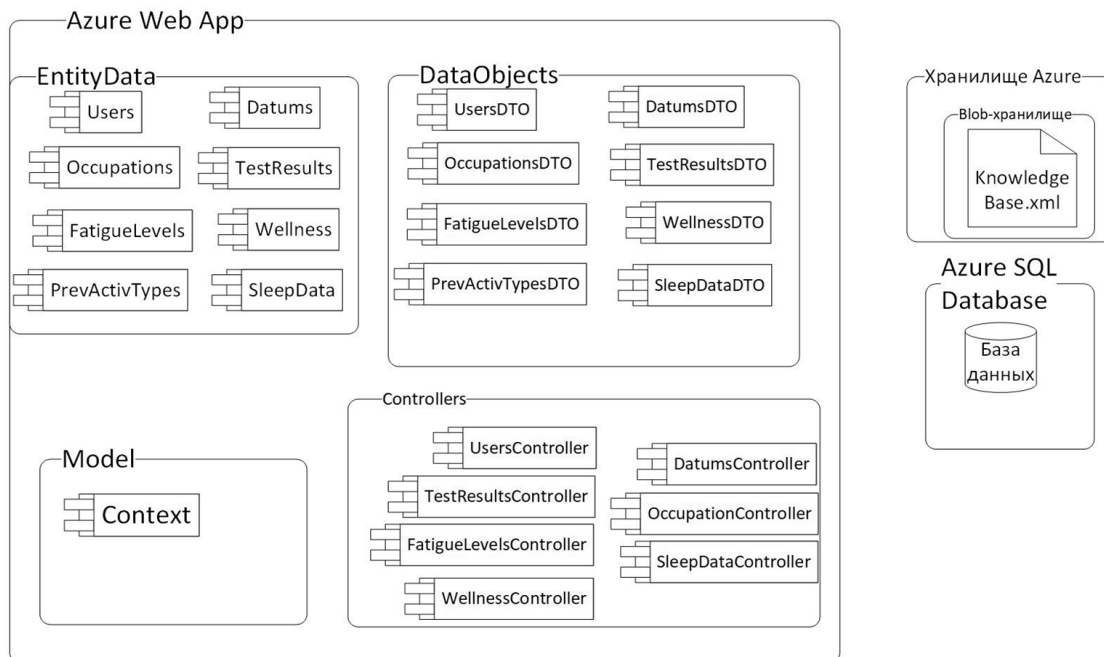


Рисунок 3 – Компоненты сервер-приложения.

**База знаний** для мобильного приложения оценки усталости водителей состоит из 10 фреймов (рис. 4) [10, 11].

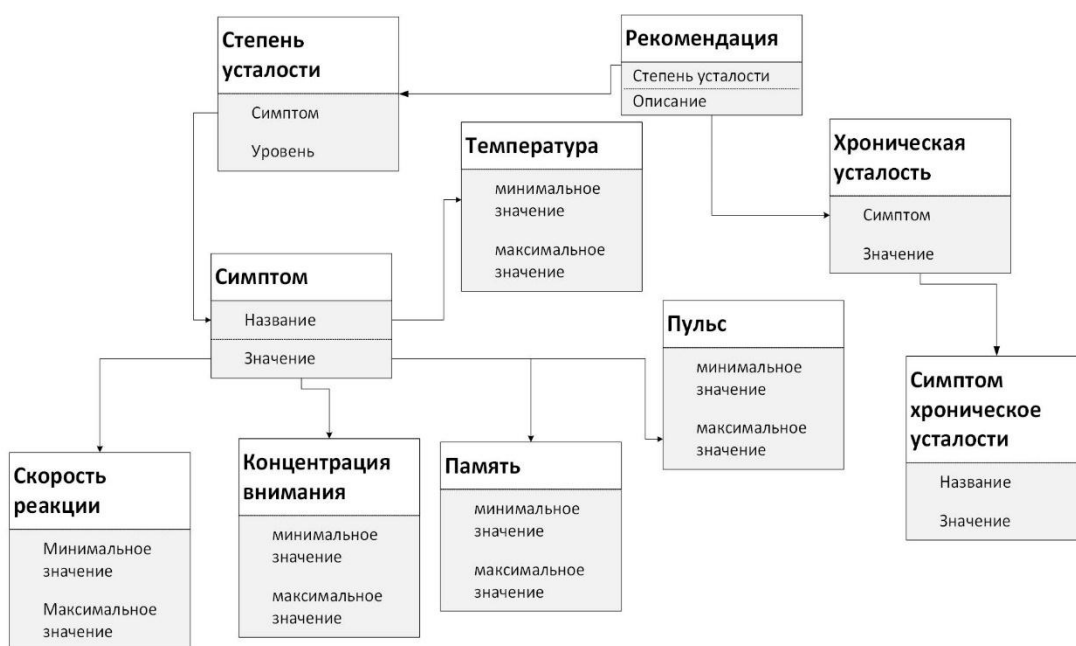


Рисунок 4 – Структура базы знаний

Фрейм «Степень усталости» предназначен для хранения знаний об уровнях усталости и соответствующих симптомах.

Фрейм «Симптом» хранит факты о симптомах и соответствующих им значениях.

Фрейм «Температура» хранит факты о пороговых значениях температуры тела пользователя.

Фрейм «Давление» хранит факты о пороговых значениях артериального давления пользователя.

Фрейм «Пульс» хранит факты о пороговых значениях пульса тела пользователя.

Фрейм «Скорость реакции» хранит знания о возможных значениях скорости реакции пользователя по результатам тестирования.

Фрейм «Память» хранит факты о возможных значениях результата тестирования памяти пользователя.

Фрейм «Концентрация внимания» хранит факты о возможных значениях результата тестирования концентрации внимания пользователя.

Фрейм «Рекомендации» предназначен для хранения общих рекомендаций при определенной степени усталости пользователя.

Фрейм «Хроническая усталость» предназначен для хранения знаний о симптомах хронической усталости.

Фрейм «Симптомы хронической усталости» хранит знания о симптомах хронической усталости человека.

**База данных.** Для хранения данных информации о пользователях и результатах оценки усталости водителей необходима разработка базы данных системы.

Таблица Users предназначена для хранения информации о существующих в системе аккаунтах.

Таблица Datums предназначена для хранения информации о личных данных пользователя (Имя, возраст, пол, сфера деятельности).

Таблица TestResults предназначена для хранения данных о результатах тестирования пользователя, включая физические и психоэмоциональные показатели, а также дату тестирования.

Таблица FatigueLevels предназначена для хранения данных о возможных степенях усталости.

Таблица Occupations включает информацию о профессиях и сферах деятельности, которые входят в группу повышенного риска.

Мобильное приложение работает в следующих режимах:

- Инициализация параметров. Приложение работает в этом режиме при первом запуске в мобильном устройстве. Данный режим предполагает запрос на разрешение использования ресурсов устройства для работы приложения;
- Режим нормальной работы приложения, начинает функционировать после инициализации параметров системы;
- Сбой работы приложения. Данный режим предполагает аварийный выход из приложения;
- Блокировка управляющих кнопок, подразумевает отсутствие связи с сервером или с интернетом при первом запуске приложения, все управляющие кнопки приложения недоступны для нажатия (рис. б).

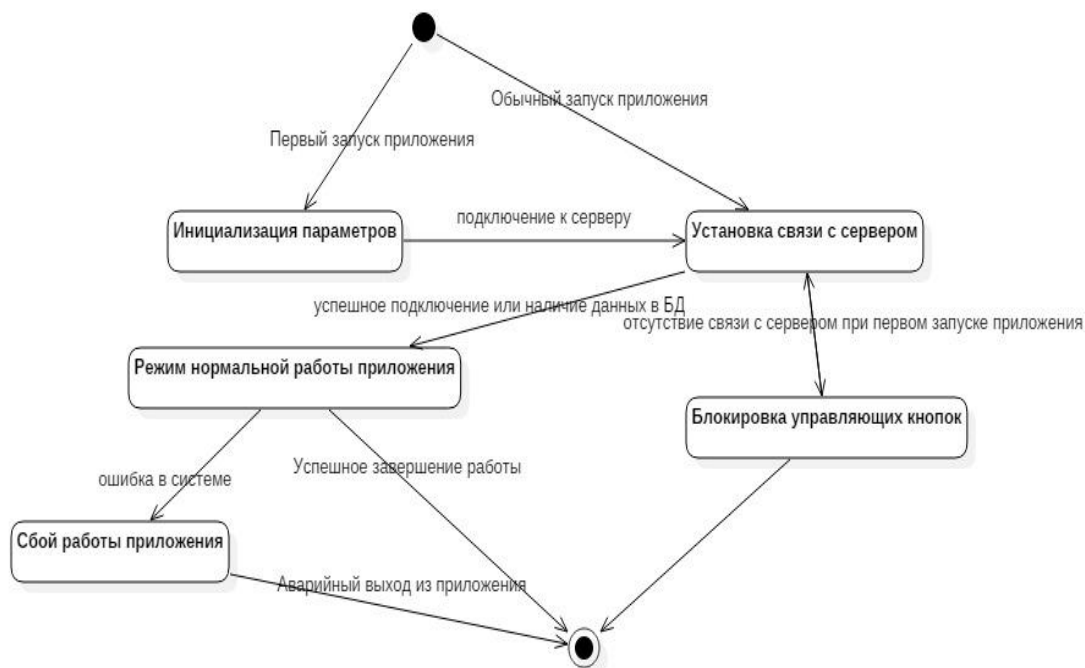


Рисунок 6 – Диаграмма состояний мобильного приложения.

**Принцип работы приложения.** В ходе разработки мобильного приложения оценки усталости водителей были реализованы следующие разделы:

- 1) Регистрация пользователя;
- 2) Авторизация пользователя;
- 3) Главная страница приложения;
- 4) Экран с личной информацией о пользователе;
- 5) Экран с информацией о текущем состоянии пользователя;
- 6) Тестирующая система с мини-играми и контрольными вопросами для выявления усталости;
- 7) Тестирующая система выявления нарушений качества сна;
- 8) Экран с результатами теста и соответствующими рекомендациями.

**Выводы.** В статье приведен пример разработки интеллектуального мобильного приложения на базе экспертной системы. Проведен сравнительный анализ существующих решений аналогичных приложений, выявлены их достоинства и недостатки.

Описаны этапы и подходы разработки, а также реализация следующих компонентов мобильного приложения: сервер-приложения, базы знаний, базы данных, клиент-приложения для платформы Android, мобильного приложения для платформы Wear OS. Описан принцип работы мобильного приложения, разработанного с использованием фреймворка Xamarin и облачного сервиса Azure Mobile Services.

### Литература

1. П.В. Никитин, А.А. Мурадянц, Н.А. Шостак. Мобильное здравоохранение: возможности, проблемы, перспективы. / П.В. Никитин, А.А. Мурадянц, Н.А. Шостак. // Клиницист Т.9 - 2015. - № 4 – с.13-21
2. Фокин С.Ю., Киричек Р.В. Обзор медицинских приложений, устройств и технологий связи интернета вещей. / С.Ю. Фокин, Р.В. Киричек. // Информационные технологии и телекоммуникации Т. 4– 2016.- №4. – с. 67-80 г.

3. Анастасия Белокурова. С телефона в облака: Azure Mobile Services. С чего начать? [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://habr.com/company/dataart/blog/276031/> (Дата обращения 21.03.2018)
4. Андрей Шелёхин. Подробнее о Xamarin [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://habr.com/post/188130/> (Дата обращения 15.04.2018)
5. Волчек Ю.А., Шишко О.Н., Спиридонова О.С., Мохорт Т.В. Положение модели искусственной нейронной сети в медицинских экспертных системах // *Juvenis scientia*. – 2017 – №9. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/polozhenie-modeli-iskusstvennoy-neyronnoy-seti-v-meditsinskih-ekspertnyh-sistemah> (Дата обращения: 26.05.2018).
6. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб: Питер. 2000. 384 с.
7. Газенкамф К.А., Шнайдер Н.А., Дмитренко Д.В., Кантимирова Е.А., Медведева Н.Н. Влияние нарушений продолжительности и качества сна на состояние психофизиологического здоровья и успеваемости студентов // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2015. – № 12-2. – С. 257–260
8. Джозеф Джарратано, Гари Райли, Экспертные системы. Принципы разработки и программирование // 4-е издание / Вильямс, 2007. – 1152 с
9. Владимир Юнев. Облачный бэкенд как сервис для Windows, iOS, Windows Phone, Android и мобильных HTML5-приложений [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://msdn.microsoft.com/ru-ru/dn271646.aspx> Дата обращения: 14.02.2018.
10. Кожоголова, А.К. Выбор модели представления знаний в мобильном приложении для оценки риска усталости / А.К. Кожоголова // *Сборник трудов VI Всероссийского конгресса молодых ученых (Санкт-Петербург, 2017 г.)*. – 2017. – С. 99–104.
11. Кожоголова, А.К. Сравнительный анализ моделей представления знаний в экспертных системах / А.К. Кожоголова // *Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сборник материалов IX Международной конференции молодых ученых и студентов (Бишкек, 27–28 марта 2017 г.)*. – 2017. – С. 354-359.
12. Система контроля состояния водителя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://systemsauto.ru/active/monitoring-condition-driver.html> (Дата обращения 21.02.2018).

*А.К. Кожогулова, [altynaikozhogulova@gmail.com](mailto:altynaikozhogulova@gmail.com)*

*ЗАО "Альфа-Телеком", Кыргызстан, Бишкек,*

*аспирантка Института машиноведения и автоматизации НАН КР*

## **ТЕСТИРОВАНИЕ МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ УСТАЛОСТИ ВОДИТЕЛЕЙ**

В статье приведен пример разработки интеллектуального мобильного приложения на базе экспертной системы, дано описание видов тестирования для оценки состояния водителей, приведены результаты пробного тестирования разработанного приложения с участием респондентов разного стажа вождения.

**Ключевые слова:** Android-приложение, интеллектуальные системы, приложения для мобильной системы, сервер-приложение, протокол передачи данных, тестирование приложения.

**Введение.** В настоящее время существует множество сценариев разработки медицинских мобильных приложений (mHealth). Как правило, все mHealth-приложения включают в себя следующие компоненты [1]:

1. Мобильное устройство с доступом в Интернет;
2. Датчики (гаджеты), от которых поступает информация на мобильное устройство;
3. Базы данных для хранения и обработки информации;
4. Средства передачи информации (Интернет, Bluetooth, сотовая связь).

В зависимости от своего назначения, mHealth-приложения принято делить на несколько категорий [1, 2]:

- для сбора данных о медицинских показателях пользователя;
- для контроля лечения, точности выполнения медицинских предписаний и принятия медикаментов;
- для лечения определенной болезни;
- Фитнес-приложения, функции которых включают в себя замеры физических показателей пользователя и их анализ, а также составление программы тренировок и физической активности;
- Приложения для диагностики, позволяющие получить консультацию от эксперта на основе данных, получаемых с помощью мобильного устройства;
- Медицинские приложения, позволяющие осуществлять мониторинг состояния пользователя, сообщать врачу о здоровье пациента. Подобные приложения обладают функцией принятия решения.

В рамках данной работы создано Android-приложение оценки усталости водителей для мобильного устройства на основе множества параметров с применением клиент-серверной архитектуры; создано Android Wear-приложение оценки усталости для смарт-часов с возможностью снятия физических показателей пользователя, а также с возможностью передачи данных на мобильное устройство; определен протокол передачи данных между мобильным устройством и смарт-часами; определен облачный сер-



вер для хранения знаний и данных; разработано сервер-приложение для взаимодействия мобильного приложения с облачным хранилищем; разработана база знаний, содержащая факты и знания об усталости водителей и база данных, хранящую информацию о пользователях и их состоянии;

### **Категории MHealth-устройств**

В настоящее время активно разрабатываются специальные устройства, которые обладают функциями оценки физического состояния пользователя, синхронизации данных со смартфоном, а также передачи полученных данных специалисту. Некоторые из таких устройств, позволяют отправлять данные на облачные сервера [2]:

- Фитнес-трекеры предназначены для контроля физической активности и физиологических показателей пользователя, таких как пульс, калории, количество пройденных шагов, данные от которых передаются на смартфон или компьютер, где с помощью специального приложения производится анализ здоровья и активности пользователя и выдаются рекомендации;
- Устройства, осуществляющие мониторинг одного показателя (глюкометры, тонометры, ингаляторы) предназначены для контроля определенного показателя с целью выявления и лечения болезней, возникающих в результате сбоя или болезни, непосредственно связанного с этим показателем. Вся информация с этих устройств передается на смартфоны или облачные сервера;
- Смарт-часы обладают возможностями соединения и синхронизации со смартфоном, а также работать как отдельные устройства, чаще всего они оснащены специальными датчиками (пульсометрами, тонометрами и т.д.).

**Постановка задачи.** Провести тестирование разработанного мобильного приложения оценки усталости водителя и проанализировать результаты.

### **Требования к мобильному приложению**

Для реализации мобильного приложения оценки усталости водителя нами были определены следующие функциональные требования:

- Возможность регистрации и авторизации пользователя в системе;
- Возможность просмотра личных данных;
- Возможность тестирования пользователя на усталость;
- Возможность отображения физических показателей пользователя (пульс, температура, давление);
- Возможность просмотра рекомендаций пользователю на основе проведенного тестирования.

**Предлагаемое решение.** При проектировании Android-приложения оценки состояния усталости водителей была выбрана трехзвенная архитектура «клиент-сервер-база данных». Было решено базу данных разместить в облачном сервисе. Это позволит приложению работать с большим количеством данных, а также работать с общими данными и знаниями в случае реализации приложения для других мобильных платформ. В качестве механизма взаимодействия с облачными сервисами выбран архитектурный стиль REST API. Таким образом, была сформирована структура мобильной системы для оценки усталости водителей, которая состоит из следующих элементов:

1. Android-приложение оценки усталости водителей для смартфона, предназначенное для тестирования и оценки состояния пользователя;

2. Android Wear-приложение для смарт-часов, собирающее информацию с датчиков о физических показателях пользователя и с возможностью синхронизации со смартфоном;
3. База знаний, содержащая информацию о фактах, связанных с усталостью водителя и синдромом хронической усталости;
4. База данных, содержащая персональные данные о пользователях;
5. Сервер, предназначенный для обмена данными между базой данных и мобильным приложением.

Функционирование приложения начинается с синхронизации данных с приложением для смарт-часов. По выбору пользователя открывается тест для оценки состояния водителя. Из базы знаний извлекаются факты. По окончании теста осуществляется оценка усталости пользователя, согласно имеющимся знаниям. Мобильное приложение генерирует соответствующее результату тестирования экспертную рекомендацию для водителя. Далее данные, полученные со смарт-часов и результаты тестирования, заносятся в локальную и удаленную базы данных.

В качестве фреймворка для разработки мобильного приложения была выбрана платформа Xamarin, предназначенная для разработки кроссплатформенных мобильных приложений на ОС Android, IOS, Windows Phone, основанная на реализации платформы NET-Mono. Разработка приложений осуществляется на языке программирования C#.

Для хранения и обработки знаний и данных мобильного приложения выбрана платформа Microsoft Azure, позволяющая создать службу мобильных сервисов, которая обеспечивает единую логику для всех мобильных операционных систем (Android, IOS, Windows Phone), надежное хранение файлов и реляционных данных в облаке, а также безопасную проверку подлинности пользователей [3].

В качестве языка серверной логики был выбран язык Net Web API, поскольку он обладает всеми необходимыми возможностями для разработки облачного бэкенда, а также позволяет сохранять и обрабатывать данные как в SQL, так и в NO-SQL базах данных. Для разработки базы знаний мобильного приложения оценки усталости водителей были использованы средства языка разметки XML.

### Реализация серверной части приложения.

Архитектура сервер-приложения состоит из 3 слоев: базы данных, серверной логики и представления (рис. 1).

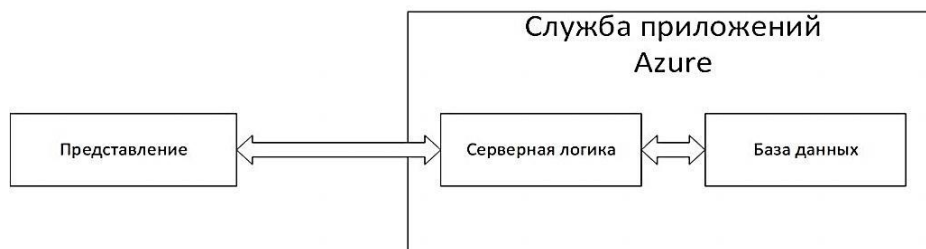


Рисунок 1 – Структура мобильного приложения

База знаний осуществляет хранение фактов (знаний), описывающих конкретную предметную область. Для принятия решения в работе [4] был произведен сравнительный анализ существующих моделей представления знаний и выбрана наиболее подходящая предметная область [5]. Для представления знаний и фактов усталости водителей была выбрана фреймовая модель.

В ходе разработки мобильного приложения оценки усталости водителей было реализовано следующее:

- Регистрация пользователя;
- Авторизация пользователя;
- Главная страница приложения;
- Экран с личной информацией о пользователе;
- Экран с информацией о текущем состоянии пользователя;
- Тестирующая система с мини-играми и контрольными вопросами для выявления усталости;
- Тестирующая система выявления нарушений качества сна;
- Экран с результатами теста и соответствующими рекомендациями.

**Регистрация пользователя.** Для регистрации пользователя необходимо заполнить поля «Введите логин», «Введите пароль», «Повторите пароль» (рис. 2 а). При корректном заполнении полей и совпадении паролей осуществляется переход на страницу заполнения личных данных. Переход возможен при наличии подключения к Интернету. Страница «Личные данные» содержит поля «Имя», «Возраст», «Пол», «Род деятельности» (рис. 2 б).

На главной странице приложения доступны кнопки перехода к тестированию на усталость, а также выявления нарушений в качестве сна пользователя (рис. 2.в), отображается главное и контекстное меню приложения для перехода на страницы личной информации, информации о программе и выхода из системы. После прохождения теста появятся текущие результаты тестов.

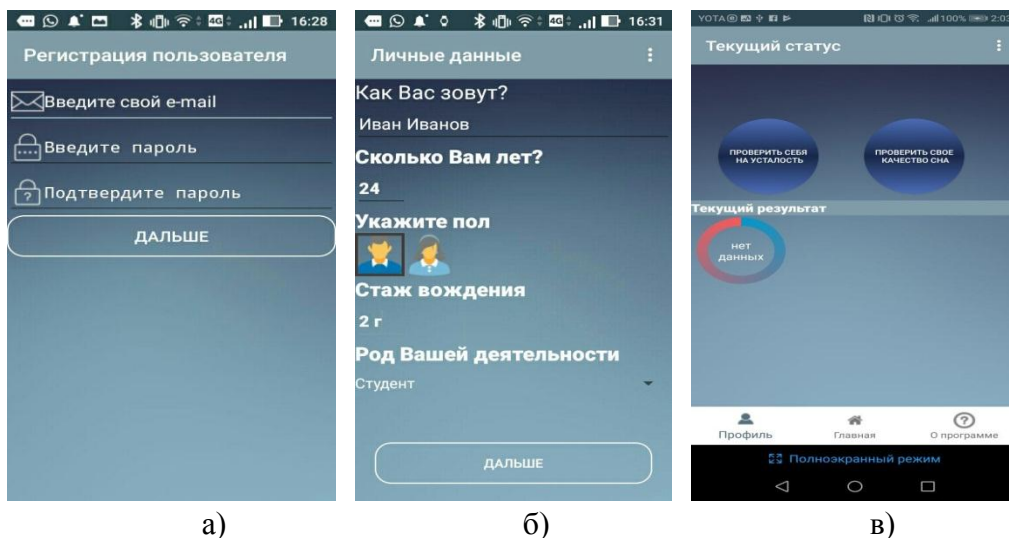


Рисунок – 2. а) Страница приложения «Регистрация пользователя»;  
б) Страница приложения для ввода личных данных;  
в) Главная страница приложения

**Тестирующая система с мини-играми и контрольными вопросами для выявления усталости.**

Методика Ю.В. Шувалова комплексной оценки психофизиологического состояния организма включает в себя 2 этапа: 1) тестирование с целью выявления функциональных характеристик организма; 2) Расчет психофизиологического потенциала человека, оценка результатов на основе тестирования [6].

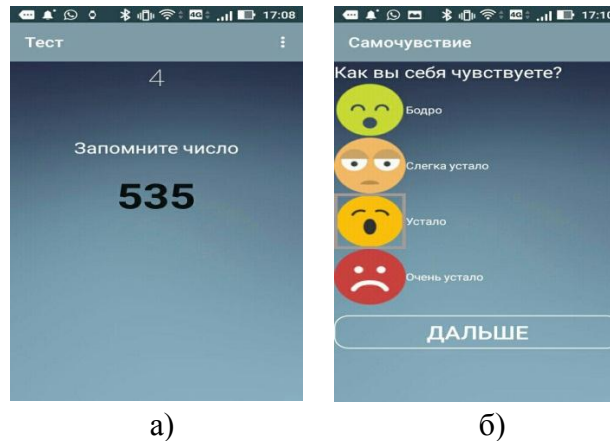


Рисунок 3 а) – Страница тестирования «Самочувствие», б) – «Память».

При запуске тестирующей системы открывается экран с изображением числа, необходимого для запоминания (рис. 3 а). Это число требуется ввести в конце тестирования. Данный тест необходим для оценки концентрации памяти пользователя, нарушение которой может быть одним из признаков усталости [7,8].

Далее открывается экран с вопросом о самочувствии пользователя (рис. 3 б). Этот вопрос необходим для оценки уровня эмоциональной усталости. Для пользователя доступен выбор одного из вариантов ответов. С этого экрана пользователю доступна функция перехода на следующий этап тестирования.

При нажатии кнопки «Дальше» открывается экран с вопросами, напрямую связанных с симптомами усталости. Эти вопросы загружаются из базы знаний приложения, которая размещена на сервере. На этой странице возможен выбор одного или нескольких симптомов, соответствующих состоянию пользователя. Каждый симптом соответствует определенной степени физической усталости. При отсутствии симптомов пользователь может пропустить данный раздел тестирования. Для этого необходимо нажать на кнопку перехода на следующую страницу (рис. 4).

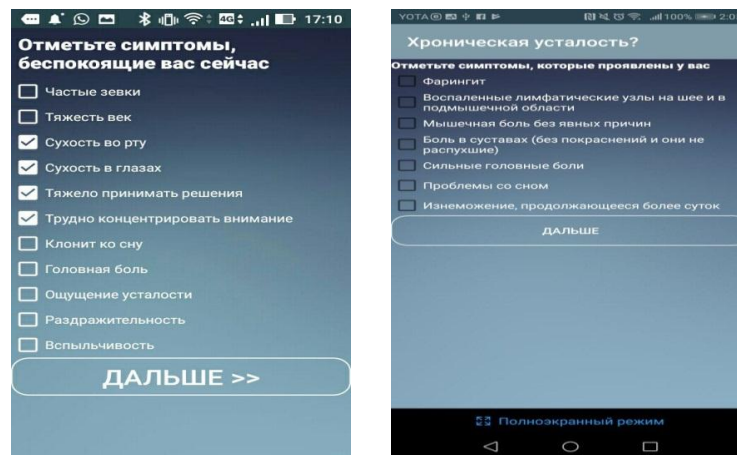


Рисунок 4 – Страницы выявления симптомов усталости и выявления симптомов хронической усталости.

При обнаружении у пользователя наличия симптомов усталости четвертой степени, для пользователя дополнительно открывается страница с вопросами их выявления симптомов хронической усталости. Доступен выбор одного или нескольких симптомов. При отсутствии таковых пользователю доступна кнопка перехода в следующий раздел тестирования. На следующей странице отображается страница для ввода данных о времени пробуждения пользователя, эта информация необходима для сбора данных о ре-

жиме сна и бодрствования водителя, что также влияет на усталость пользователя [8]. Пользователю доступен элемент интерфейса для выбора времени пробуждения, а также кнопка перехода в следующий раздел.

При нажатии кнопки перехода открывается страница с вопросами о количестве времени, отведенного на сон в течение последнего дня (двух дней при первичном тестировании). Также задан вопрос о количестве предстоящих часов за рулем. Эти данные также необходимы для сбора информации о режиме сна и бодрствования пользователя. Пользователю доступны поля для ввода количества часов, а также кнопка перехода на следующую страницу (рис. 5).

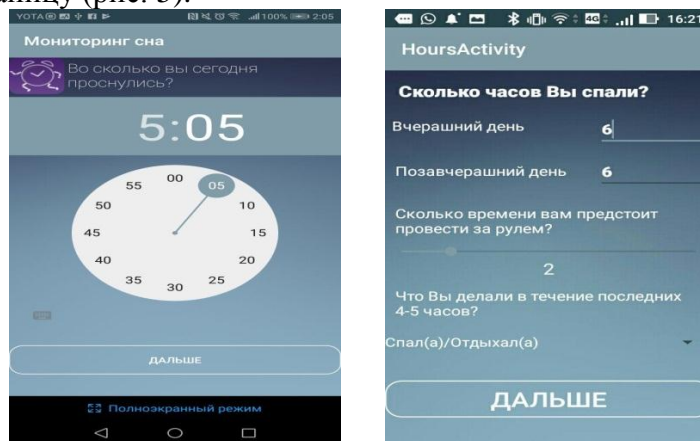
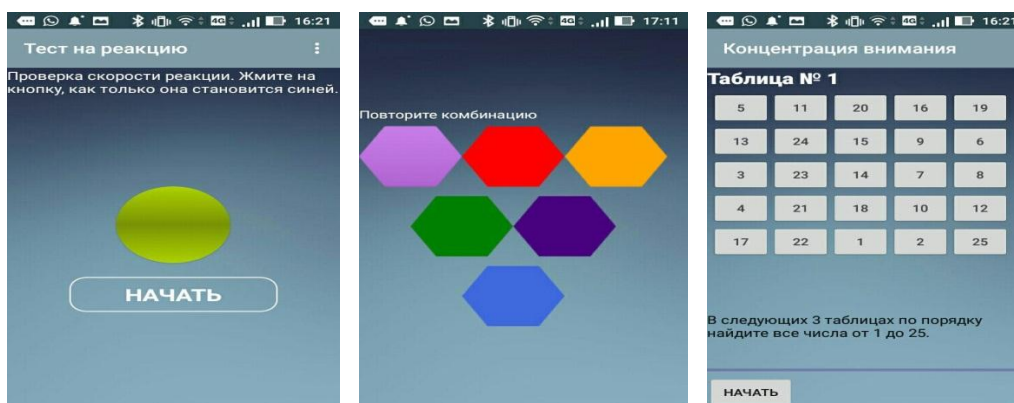


Рисунок 5 – Страницы анализа сна пользователя

Далее открывается страница с мини-игрой для проверки скорости реакции пользователя. Этот тест необходим для выявления нарушений в скорости реакции на визуальный сигнал, что также является признаком усталости пользователя [8]. При нажатии кнопки «Начать» запускается игра. В течение игры необходимо нажимать на кнопку, как только она меняет свой цвет. Скорость реакции оценивается в миллисекундах и ее значением является отрезок времени от смены цвета до нажатия на кнопку пользователем. (Рисунок 6 а). По завершении мини-игры на скорость реакции открывается мини-игра на память. Данная игра позволяет обнаружить нарушения в концентрации памяти (рис. 6 б). Далее открывается страница с мини-игрой на переключение и концентрацию внимания. Нарушение концентрации внимания является одним из психофизиологических признаков усталости [6,7].



а)

б)

в)

Рисунок 6 а) – Страница для тестирования скорости реакции, б) – Страница тестирования памяти пользователя, в) – Страница тестирования концентрации внимания.

В разработанном приложении тестирование внимания пользователя осуществляется при помощи таблиц Шульте, которые представляют собой таблицы размером 5×5 с расположенными в случайном порядке числами от 1 до 25. Скорость прохождения теста определяет уровень концентрации внимания пользователя. На странице приложения отображены правила игры, а также кнопка «Начать» (Рисунок 6 в). Далее открывается экран для ввода числа, которое необходимо было запомнить в начале теста. На экране доступна кнопка «Дальше», при нажатии которой открывается экран с результатами и рекомендациями.

### Тестирующая система выявления нарушений качества сна

Выявление нарушений сна и выдача соответствующих рекомендаций по повышению его качества является одним из основных аспектов борьбы с усталостью и предотвращению синдрома хронической усталости [9]. Приложение оценки усталости водителей также включает в себя функцию выявления нарушений сна пользователя. Для начала тестирования необходимо нажать на кнопку «Проверить свое качество сна» главной странице приложения. Оценивание осуществляется по следующим параметрам: скорость засыпания, продолжительность сна, глубина сна и самочувствие после пробуждения (рис. 7 а). При нажатии кнопки «Дальше» приложение анализирует полученные баллы, в зависимости от которых приложение продолжает или завершает тестирование при достаточном количестве баллов. При продолжении тестирования открывается страница с вопросами о наличии симптомов нарушений сна, загружаемыми из базы знаний приложения, размещенной на сервере (рис. 7 б). При наличии определенного количества перечисленных симптомов, заданных в системе, система завершает тестирование и выдает результат.

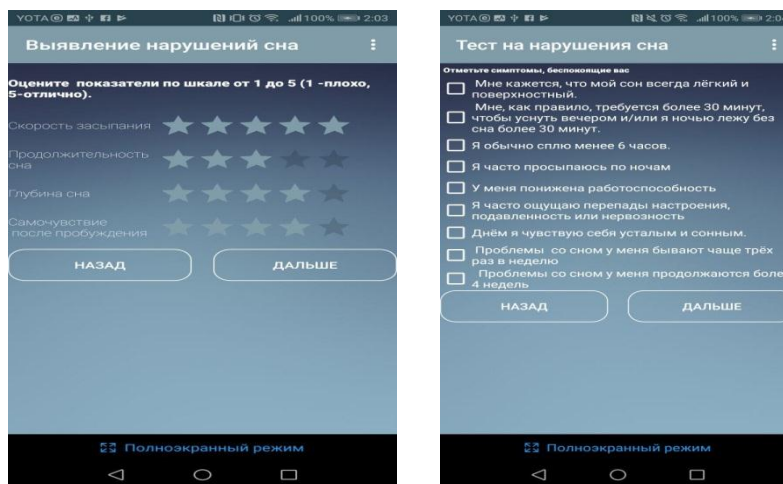


Рисунок 7 а) – Страница оценки качества сна. б) – Симптомы нарушения сна

**Экран с результатами теста и соответствующими рекомендациями.** По завершению прохождения теста происходит анализ результатов теста, на основе анализа результатов теста формулируются рекомендации о самочувствии, состоянии физических показателей, режиме сна и степени усталости пользователя. Далее открывается страница с результатами. Экран поделен на две части: в верхней части отображены результаты тестирования, а в нижней – выданы сформулированные рекомендации пользователю (рис.8).



Рисунок 8 – Страница результатов тестирования

Пользователь не может сознательно приостановить выполнение теста, а при нажатии кнопки «Выйти» все данные и прогресс прохождения теста не сохраняются.

**Реализация приложения для смарт-часов.** Устройство, работающее на ОС Wear OS (Android Wear), взаимодействует со смартфоном посредством технологии беспроводной передачи данных Bluetooth. Приложение оценки усталости водителя, реализованное на платформе Wear OS, работает как самостоятельное и также включает функцию синхронизации данных с приложением оценки усталости для платформы Android. Передача данных осуществляется в случае, если пользователь авторизован в приложении. Для подключения к слою данных использовались библиотеки GoogleApi. Для обмена сообщениями и данными между устройствами использовались классы Node API, Message API, Data API [10].

Приложение начинает работу со страницы замера физиологических показателей пользователя с помощью сенсоров, встроенных в смарт-часы (рис.9).



Рисунок 9 – Страница замера пульса

Далее открываются страницы с мини-играми, аналогичные приложению по оценке усталости, предназначенному для ОС Android. Но для оценки концентрации внимания пользователя тесты с таблицами Шульце были заменены на цветовой тест Струпа. Тест Струпа представляет собой набор слов, значение которых определено названием какого-либо цвета, при этом цвет шрифта слова может не совпадать с его значением. Задача испытуемого – определять название цвета шрифта вне зависимости от значения слова [11]. Скорость ответа на каждый вопрос, а также количество допущенных ошибок позволяют сделать вывод о концентрации внимания пользователя (рис.10).

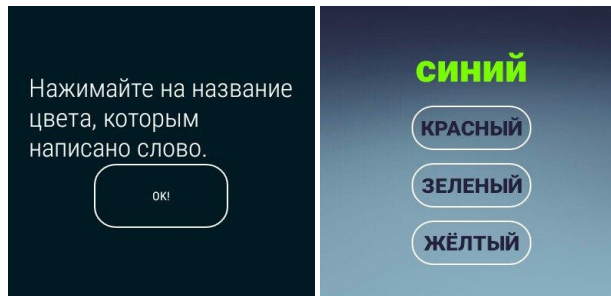


Рисунок 10 – Страница тестирования концентрации внимания

Далее открывается мини-игра для оценки скорости реакции пользователя (рис. 11).

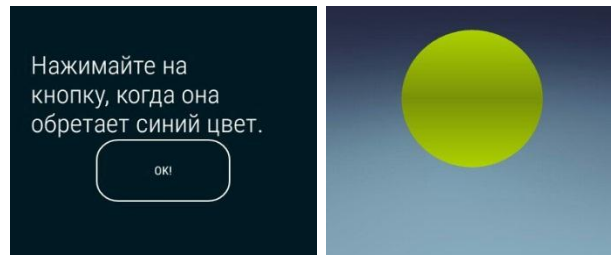


Рисунок 11 – Страница тестирования скорости реакции

После прохождения теста на проверку скорости реакции пользователю предлагается тест для оценки концентрации памяти.

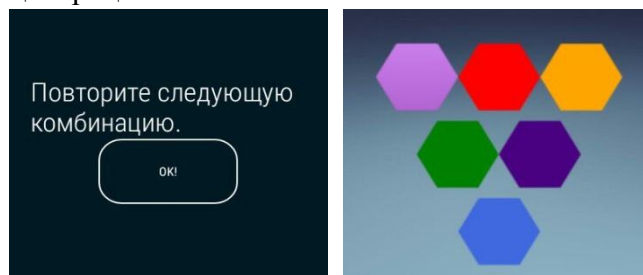


Рисунок 12 – Страница тестирования памяти пользователя

По завершении теста приложение выдает результат анализа показателей пользователя (рис. 13). При наличии связи с приложением для платформы Android-приложение отправляет результаты тестирования на смартфоны. Эти результаты далее анализируются Android-приложением и передаются в базу данных.

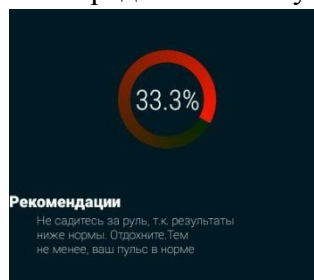


Рисунок 13 – Страница результатов тестирования

## ТЕСТИРОВАНИЕ РАБОТЫ МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ

**Исходные данные при проведении тестирования.** Для анализа работы приложения были выбраны 10 человек (респондентов) разного возраста и рода деятельности, которые были протестированы на усталость при помощи разработанного мобильного приложения (табл. 1).



Таблица 1 – Данные пользователей

№ респондента	Пол	Возраст	Род деятельности	Стаж вождения (в годах)
1	Мужской	57	Работа по сменам	39
2	Мужской	35	Работа по сменам	9
3	Женский	22	Студент	отсутствует
4	Женский	25	Студент	отсутствует
5	Женский	23	Работа 5 дней 8 часов в неделю	6
6	Мужской	23	Работа по сменам	3
7	Женский	22	Студент	4
8	Мужской	23	Работа по сменам	5
9	Женский	22	Работа по сменам	1
10	Мужской	23	Студент	4

При сборе данных о пользователе приложение учитывает следующие характеристики: *Возраст; Пол; Стаж вождения; Сфера деятельности.*

При первичном прохождении теста приложение оценивает пользователя по следующим критериям: *Время пробуждения; Количество часов, потраченных на сон в течение последних двух дней; Вид занятия, которым пользователь занимался в течение последних часов до прохождения теста.*

### **Анализ результатов тестирования**

#### **Тест 1. Оценка усталости респондентов**

Каждый респондент был протестирован на усталость с помощью разработанного приложения. Все результаты, полученные мобильным приложением, были сохранены в облачной базе данных (таблица 2).

Из 10 тестируемых респондентов у 8 пользователей была выявлена усталость, при этом у 2-х пользователей была выявлена 4 степень усталости, у 1-го – 3-я степень усталости, у 2-х пользователей была диагностирована 3-я степень усталости и у 3 – 1 степень усталости.

Таблица 2 – Результаты тестирования пользователей

№ респондента	Концентрация внимания, с	Пульс	Память, баллы	Скорость реакции, с	Степень усталости
1	57	79	100	1204	1
2	65	73	10	823	4
3	41	82	10	420	0
4	58	90	50	800	2
5	44	68	100	377	0
6	55	76	50	416	1
7	50	70	50	519	1
8	63	82	100	505	2
9	59	72	50	1452	4
10	60	78	100	519	3

Для оценки концентрации внимания в приложении использованы таблицы Шульте. В ходе тестирования у пользователей с симптомами усталости были выявлены нарушения концентрации внимания (Рисунок 14). У 2 пользователей оценка концентрации внимания дало удовлетворительные результаты.



Рисунок 14 – Результаты тестирования концентрации внимания

При оценке скорости реакции приложение сравнивало результаты пользователей с нормами скорости реакции человека на визуальный сигнал [8]. В ходе тестирования у 4 респондентов с симптомами усталости были выявлены отклонения. У 5 респондентов скорость реакции в пределах нормы, а высокие результаты – у пользователя без признаков усталости (рисунок 15).



Рисунок 15 – Результаты тестирования скорости реакции

По результатам тестирования концентрации памяти 4 респондента полностью справились с предложенными приложением тестами. Тест не смогли пройти 2 респондента, у одного из которых была выявлена 4 степень усталости, а у второго симптомы усталости отсутствовали (рис. 16).

В результате проведенного исследования следует вывод, о том, что мобильное приложение оценки усталости водителей отвечает всем функциональным требованиям и готово к использованию.

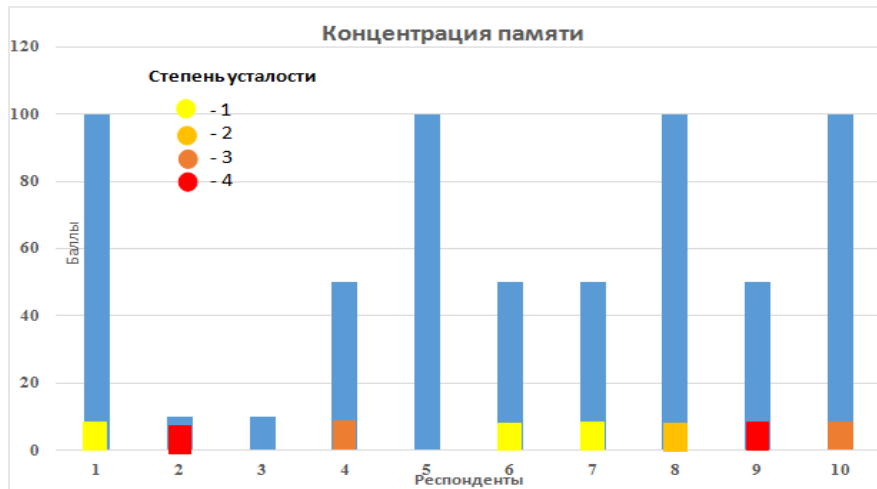


Рисунок 16 – Результаты тестирования концентрации памяти

### Тест 2. Использование смарт-часов

С помощью приложения оценки усталости, работающего под управлением операционной системы Wear OS, для выявления усталости и развития риска утомления в работе [8] были произведены тестирование и замеры пульса у каждого из респондентов. Для этого приложение было установлено на смарт-часы Ticwatch, работающие под управлением Android Wear 2.0. Далее данные были переданы на мобильное приложение, работающее под ОС Android. На основе анализа значения пульса, последней активности и длительности бодрствования приложение выявило симптомы утомления у 3 респондентов (рис.17).

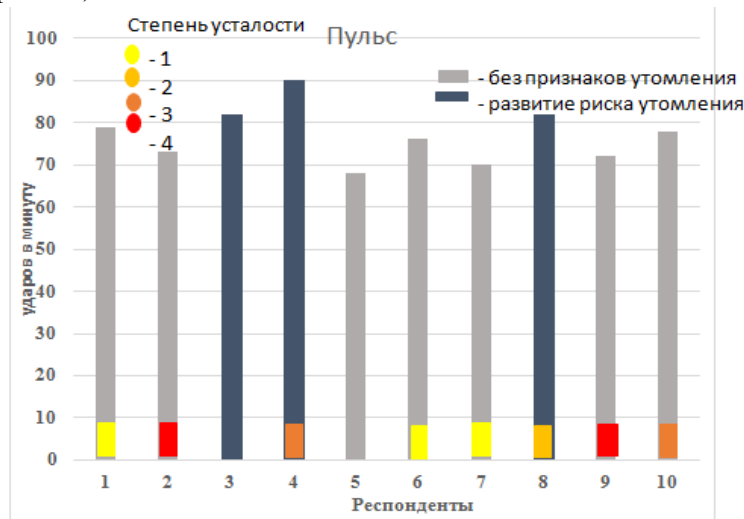


Рисунок 17 – Замеры пульса у респондентов

### Тест 3. Установка связи между психофизическими показателями и возрастом пользователей

Для определения связи между возрастом и психофизическими показателями, такими как концентрация внимания и скорость реакции, необходимо рассчитать коэффициент корреляции, который показывает направление связи между зависимыми и независимыми переменными, а также ее мощность и рассчитывается по формуле (1):

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (1),$$

где  $n$  – количество в выборке элементов.

По результатам исследования, коэффициент корреляции между возрастом респондентов и результатами теста на концентрацию внимания составляет 0,33, что означает, что в зависимости возраст также имеет влияние на скорость прохождения теста, при этом чем больше возраст, тем дольше времени требуется пользователю для прохождения теста (рис. 18).

По результатам вычислений, коэффициент корреляции между скоростью реакции и возрастом пользователей составляет 0,5, а значит эти данные имеют более сильную связь, чем концентрация внимания и возраст, при этом имеется тенденция замедления скорости реакции с увеличением возраста (рис. 19).

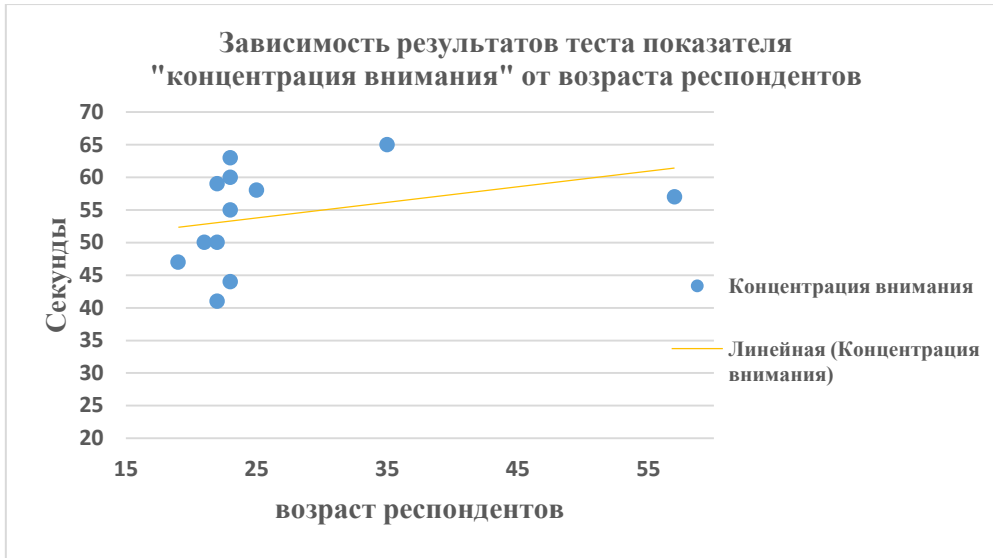


Рисунок – 18. График зависимости результатов теста концентрации внимания от возраста респондентов.

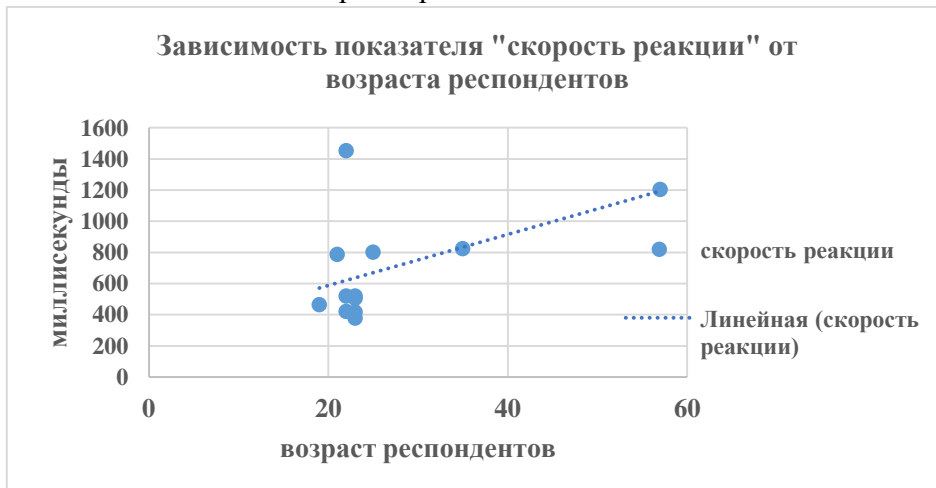


Рисунок 19 – График зависимости скорости реакции от возраста респондентов

По окончании прохождения тестирования, на основе полученных данных, приложение выдало соответствующие индивидуальные рекомендации каждому пользователю по улучшению самочувствия и улучшения показателей.

Были проведены еще два теста: Тест 4 на определение влияния времени суток на состояние респондентов и Тест 5 на определение динамики изменения пульса респондентов в течение дня. Тестирование проводилось утром, в дневное время суток и вечером. в

течение дня. В ходе проведенного тестирования, было выявлено, что в течение рабочего дня психофизиологические показатели у всех пользователей имеют тенденцию к снижению, что может быть результатом накопления усталости. При этом после каждого прохождения теста, приложение выдавало респондентам рекомендации.

В результате было выявлено, что динамика изменения показателей в периоде «утро-день» составляет от 20% до 25%, а динамика изменения показателей в периоде «день-вечер» колеблется в пределах от 25% до 75% .

#### **Выработка рекомендаций приложением на основе полученных результатов**

Для каждого респондента мобильное приложение сформировало рекомендации в зависимости от результатов тестирования. При обнаружении усталости первой и второй степени и незначительных отклонениях психофизиологических показателей приложение выдало рекомендации о кратком перерыве и отдыхе перед тем как сесть за руль. При обнаружении симптомов третьей и четвертой степени усталости приложение выдало рекомендации по полному восстановлению сил и нежелательном нахождении за рулем. При наличии симптомов хронической усталости приложение рекомендовало принять меры и обратиться к специалисту.

При отсутствии симптомов усталости, но наличии неудовлетворительных значений психофизических показателей приложение выдало рекомендации, используя данные последних действий пользователя, пульсе, режиме сна и количества часов бодрствования, при этом также рекомендовало о нежелательном нахождении за рулем.

При обнаружении симптомов развития утомления на основе данных о времени суток и значении пульса приложение выдало рекомендации по смене деятельности и необходимости полного восстановления.

**Заключение.** В ходе выполнения данной работы были получены следующие результаты:

1. Реализовано мобильное приложение для оценки усталости водителей под управлением операционной системы Android, позволяющее собирать данные о состоянии пользователя, которое включает в себя специальные тесты на концентрацию внимания, память и скорость реакции – основные показатели усталости водителя, в результате выполнения которых приложение выдает рекомендации;
2. Разработано мобильное приложение для умных часов под управлением операционной системы Android Wear, позволяющее использовать физические данные, которые можно измерить часами, для анализа состояния пользователя. Также был реализован программный интерфейс передачи данных между умными часами и мобильным приложением.
3. Реализована серверная часть приложения, необходимая для взаимодействия мобильного приложения и облачного сервера.
4. Проведено пробное тестирование разработанного приложения с участием респондентов разного стажа вождения и рода деятельности;
5. По результатам проведенного тестирования установлены закономерности между возрастом респондентов и психофизическими показателями, а также закономерности влияния времени суток на состояние респондентов; установлена взаимосвязь между физической активностью и показателями пользователя.

В перспективе планируется расширение возможностей мобильного приложения для оценки усталости работников различных сфер деятельности, а также разработка версий приложения для других платформ.

*Литература*

1. П.В. Никитин, А.А. Мурадянц, Н.А. Шостак. Мобильное здравоохранение: возможности, проблемы, перспективы / П.В. Никитин, А.А. Мурадянц, Н.А. Шостак // Клиницист Т.9 – 2015. – № 4 – с.13-21
2. Сысоев Ю.В. Изменения психофизиологических функций при длительной и напряженной деятельности: Автореф. дис. канд. пед. наук:13.00.04 / Сысоев Юрий Васильевич. – Тарту, 1974. – 32 с.
3. Владимир Юнев. Облачный бэкенд как сервис для Windows, iOS, Windows Phone, Android и мобильных HTML5-приложений [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://msdn.microsoft.com/ru-ru/dn271646.aspx> Дата обращения: 14.02.2018
4. Кожоголова, А.К. Сравнительный анализ моделей представления знаний в экспертных системах / А.К. Кожоголова // Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сборник материалов IX Международной конференции молодых ученых и студентов (Бишкек, 27–28 марта 2017г.). – 2017. – С. 354–359.
5. Кожоголова, А.К. Выбор модели представления знаний в мобильном приложении для оценки риска усталости / А.К. Кожоголова // Сборник трудов VI Всероссийского конгресса молодых ученых (Санкт-Петербург, 2017 г.). – 2017. – С. 99–104.
6. Крушельницкая Я.В. Физиология и психология труда: Учебник – М.: Финансы и статистика, 2003. – 367 с.
7. Павлова А.М. Психология труда: учебное пособие / А.М. Павлова; под ред. Э.Ф. Зеера. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т». – 2008 – 156 с.
8. Солодков А.С., Сологуб Е.Б. Физиология человека. Общая. Спортивная. Возрастная // Учебник для высших учебных заведений физической культуры. – М.: Терра-спорт – 2001 – 520 с.
9. Газенкамф К.А., Шнайдер Н.А., Дмитренко Д.В., Кантимирова Е.А., Медведева Н.Н. Влияние нарушений продолжительности и качества сна на состояние психофизиологического здоровья и успеваемости студентов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 12-2. – С. 257–260.
10. Android Wearable Programming [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://apprize.info/google/programming\\_1/2.html](http://apprize.info/google/programming_1/2.html) (Дата обращения 01.04.2018).
11. Federica Scarpina, Sofia Tagini. The Stroop Color and Word Test [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5388755/> (Дата обращения 02.04.2018).

*К.М.Акишев<sup>1</sup>, К.Ш.Арынгазин,<sup>2</sup> В.И.Карпов<sup>3</sup>*

*1. Павлодарский государственный университет им.Торайгырова,*

*2. ТОО «Экостройниш-ПВ», Казахстан,*

*3. Московский государственный университет технологии и управления  
им.К.Г.Разумовского*

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА ПАВЛОДАРСКОГО ФИЛИАЛА ТОО «КАСТИНГ»**

В Павлодарской области со времен СССР существуют металлургические предприятия, ежедневно производящие сотни тонн металлургических отходов, окалины, футеровочной обшивки и т.д. В настоящее время для улучшения экологической обстановки находят все большее распространение ресурсосберегающие технологии, в которых в качестве сырьевых компонентов возможно использование техногенных отходов или продуктов их переработки, что в условиях промышленного производства дает существенный экономический и ресурсосберегающий эффекты. В статье рассмотрены применение методов кластерного анализа для статистической оценки качества металлургического шлака ПФ ТОО «Кастинг», с использованием программного продукта «Комплексная оценка качества и классификация многомерных объектов» на основе методов Уорда, Тамуры С, Евклидова расстояния. В результате применения программного продукта «Комплексная оценка качества и классификация многомерных объектов» пробы металлургического шлака, отобранные с разных точек шлакохранилища, были разделены на кластеры и получена оценка качества металлургического шлака для дальнейшего использования в строительных материалах. Нами были разработаны эффективные рецептуры тяжелых бетонных смесей с использованием металлургических отходов ПФ ТОО «Кастинг», соответствующие требованиям ГОСТ 25192-2012.

**Ключевые слова:** системный анализ, методы кластерного анализа, показатели качества металлургического шлака, статистическая оценка, многомерный объект исследования, статистические методы.

**1. Введение.** Проблема утилизации техногенных отходов остро стоит во всем мире. Техногенное сырье конкурентно-способный, перспективный минеральный ресурс, использование которого по инновационным технологиям обеспечивает не только значительный техно-экономический эффект, но и экологический эффект, как следствие нового уровня требований производства.

В работах [1,2,3] описаны возможности применения и переработки шлаков. В работе [4] упомянуто использование новых методов переработки. Работа [5] посвящена описанию использованию гранулированных шлаков в строительных материалах.

Зарубежный опыт свидетельствует об эффективной замене значительной части вяжущих составляющих, техногенными отходами [6,7] Промышленность строительных материалов оказывает существенное воздействие на окружающую среду, которое определяется колоссальными объемами производства материалов для строительства. В настоящее время для улучшения экологической обстановки находят все большее распространение ресурсосберегающие технологии, в которых в качестве сырьевых компонентов возможно использование техногенных отходов или продуктов их переработки, что в условиях промышленного производства дает существенный экономический и ресурсосберегающий эффекты.

Город Павлодар относится к промышленным городам, на экологию которого

огромное воздействие, в числе прочих, оказывают металлургические предприятия, расположенные практически в черте города. Металлургические производства образует большое количество твердых и жидких отходов, часть из которых утилизируется, а большая часть складывается в отвалах, шламо- и хвостохранилищах, накопителях. Использование металлургических отходов в качестве вторичного сырья становится особенно актуальным, особенно в строительной и других отраслях, что позволит решить проблемы утилизации техногенных отходов, улучшить экологическую обстановку в Павлодарском регионе, создать новые строительные материалы, новые производства, за счет этого, решить экономические и социальные проблемы в Павлодарском регионе.

ПФ ТОО «Кастинг» металлургическое предприятие занимающееся производством продукции проката из скраба (металлургический лом). ПФ ТОО «Кастинг», как и другие металлургические предприятия Павлодарской области ежегодно отправляет в шлакоотвалы сотни тонн техногенного отхода металлургического шлака. В рамках Подпроекта №APP-SSG-17/0290P «Инновационные технологии использования твердых техногенных отходов предприятий теплоэнергетики и металлургии Павлодарской области в производстве строительных материалов», финансируемого в рамках Проекта «Стимулирование продуктивных инноваций», поддерживаемого Всемирным Банком и Правительством Республики Казахстан были выполнены исследования шлакоотвалов предприятия.

**Цели исследования.** Целью исследования является возможность использования металлургических отходов ПФ ТОО «Кастинг» для производства строительных материалов, с последующей разработкой рецептур бетонных смесей для производства строительных изделий. С шлакоотвалов ПФ ТОО «Кастинг» были сделаны контрольные пробы образцов металлургических шлаков в различных точках шлакоотвалов для определения модуля основности  $M_{осн}$  и коэффициента качества  $K$ , оценки качества техногенного отхода металлургического шлака.

**Материалы и методы исследования.** Для всех проб был выполнен анализ химического состава металлургического шлака. Полученные данные химического состава, номеров шлакоотвала, номера контрольных точек, оборудование с которого получен шлак с шлакоотвалов ПФ ТОО «Кастинг» были внесены в таблицу 1.

Таблица 1. Данные пробы металлургического шлака ПФ ТОО «Кастинг» с различных точек шлакового отвала.

№ п/п	Номер шлакоотвала	Номер контрольной точки	Номер пробы (плавки)	НД материала	Химический состав, %									Примечание
					Fe <sub>о6</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	S	осн	Σ	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1811	6945	292751	отс	3,9	24,9	0,5	46	9,2	4,0	0,4	1,8	90,0	АКП-1
2	1811	6946	292752	отс	5,4	23,9	0,7	49	7,2	3,2	1,2	2,1	90,7	АКП-1
3	1811	6947	292753	отс	3,7	26,5	0,6	50	9,2	3,9	0,8	1,9	94,9	АКП-1
4	1811	6948	292754	отс	4,9	27,1	0,6	50	6,8	2,9	0,8	1,9	93,9	АКП-1
5	1811	6949	292755	отс	4,8	23,4	0,6	47	7,4	4,0	0,9	2,0	88,8	АКП-1
6	1812	6950	393085	отс	1,7	27,4	0,6	51	6,6	2,4	0,8	1,9	90,5	АКП-2
7	1812	6951	393086	отс	2,0	27,6	0,6	51	6,8	2,7	0,7	1,9	91,9	АКП-2
8	1812	6952	393087	отс	1,4	27,8	0,5	52	6,2	1,9	1,0	1,9	91,4	АКП-2
9	1812	6953	393088	отс	5,7	26,1	0,4	49	9,6	3,8	0,5	1,9	95,3	АКП-2
10	1812	6954	694669	отс	3,1	26,8	0,6	52	6,8	2,5	1,0	2,0	93,1	АКП-2



11	1814	6963	292761	отс	0,8	25,4	1,0	55	6,2	1,8	1,0	2,2	91,2	АКП-1
12	1814	6964	292762	отс	0,3	24,0	0,4	56	6,6	0,9	1,0	2,3	89,4	АКП-1
13	1814	6965	292763	отс	0,3	26,2	0,5	58	6,9	0,9	1,2	2,2	94,6	АКП-1
14	1814	6966	292764	отс	0,7	25,8	0,4	55	7,8	3,1	0,5	2,2	93,8	АКП-1
15	1814	6967	292765	отс	0,3	24,4	0,3	56	7,1	1,3	0,8	2,3	90,9	АКП-1
16	1815	6968	393093	отс	1,5	25,4	0,6	54	6,8	2,8	0,4	2,1	91,9	АКП-2
17	1815	6969	393094	отс	1,3	27,2	0,7	52	6,8	2,5	0,4	1,9	91,6	АКП-2
18	1815	6970	393095	отс	1,4	27,1	0,7	54	7,1	2,7	0,4	2,0	93,5	АКП-2
19	1815	6971	393096	отс	0,4	25,9	0,4	53	6,3	1,1	1,0	2,1	88,4	АКП-2
20	1815	6972	393097	отс	0,5	27,8	0,5	54	6,3	1,0	1,1	2,0	91,9	АКП-2
21	1807	6989	292770	отс	0,6	26,0	0,5	58	7,0	1,6	1,0	2,2	94,9	АКП-1
22	1807	6990	292771	отс	0,4	27,2	0,6	59	6,8	1,1	1,2	2,2	96,8	АКП-1
23	1807	6991	292772	отс	0,5	29,4	0,8	52	7,6	1,5	1,0	1,8	93,2	АКП-1
24	1807	6992	292773	отс	0,2	29,0	0,4	53	6,9	1,5	0,8	1,8	92,1	АКП-1
25	1807	6993	292774	отс	0,3	30,2	0,6	53	7,5	1,5	1,0	1,8	94,3	АКП-1
26	1808	6994	393103	отс	1,6	27,6	0,6	54	6,7	3,1	0,7	2,0	94,1	АКП2
27	1808	6995	393104	отс	1,6	27,2	0,7	53	6,7	3,1	0,4	2,0	92,9	АКП-2
28	1808	6996	393105	отс	2,3	28,8	0,4	53	6,8	5,1	0,6	1,8	97,1	АКП-2
29	1808	6997	393106	отс	1,2	27,3	0,6	57	6,3	1,7	0,7	2,1	94,8	АКП-2
30	1808	6998	393107	отс	0,3	26,6	0,5	59	6,6	1,0	1,2	2,2	95,8	АКП-2

Для обработки данных таблицы 1 применены методы кластерного анализа для оценки качества металлургического шлака.

Разработка технологических систем производства с использованием техногенных отходов металлургии ставит требования, предъявляемые к учету качества исходного сырья, а контроль, оценка и настройка параметров его обработки значительно повышает эффективность технологических систем. В связи с отсутствием каких-либо данных по модулю основности  $M_k$  и коэффициенту качества  $K$  металлургического шлака ПФ ТОО «Кастинг», для определения типовых кластеров металлургического шлака (техногенного отхода) применены методы мягких вычислений (метода кластеризации многомерных объектов)[1]. В настоящее время используется достаточно большое количество методов статистической оценки качества. В нашем исследовании мы проводили оценку с использованием программного продукта «Комплексная оценка качества и классификация многомерных объектов» используя методы Уорда, Тамуры С, Евклидово расстояние, нами были изучены работы по методам кластерного анализа и использованию методов кластерного анализа в различных сферах применения[8,9,10].

Задача кластеризации рассматривается, как задача классификации многомерных объектов. Для нашей задачи исходное множество объектов (номер контрольной точки) рассматривается в виде множества многомерных объектов  $S$ :

$$S = \{ S_n \}, \quad n = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где  $S_n$  –  $n$ -ый объект;  $n$  – номер объекта(пробы);  $N$  – количество объектов (номеров контрольных точек).

Характеристики объектов представлены в виде матрицы характеристик  $X$ , именуемой также матрицей «объект-свойство»:

$$S_n = \{ X_{nm} \}, \quad X = \parallel X_{nm} \parallel, \quad m = \overline{1, M}, \quad (2)$$

где  $X_{jm}$  –  $m$ -ая характеристика  $n$ -ого объекта;  $X$  – матрица характеристик заданного множества объектов;  $m$  – номер характеристики;  $M$  – общее количество характеристик.

Задача кластеризации заключается в разбиении исходной совокупности объектов  $S$  (**номеров контрольных точек**) на заранее неизвестное множество однородных классов  $C_o$  т.о., чтобы объекты каждого класса были в определенном смысле сходны между собой, а сами классы объектов отличались бы друг от друга, так что отыскивается своего рода «естественное» расслоение исходного множества объектов на классы:

$$C_o = \{ C_k \}, \quad k = \overline{1, K_o}, \quad C_k = \{ S_n \}, \quad n = \overline{1, N_k}, \quad (3)$$

$$S = \bigcup_{k=1}^{K_o} C_k, \quad \forall C_k \in C_o, \quad \forall C_l \in C_o : C_k \cap C_l = \emptyset, \quad (4)$$

$$k = \overline{1, K_o}, \quad l = \overline{1, K_o}, \quad k \neq l.$$

где  $C_k$  – множество объектов  $k$ -го класса;  $k$  – номер класса;  $K_o$  – оптимальное количество классов объектов;  $N_k$  – количество объектов  $k$ -го класса

Для разбиения исходной совокупности объектов на оптимальное количество классов, т.е. определения оптимальной кластеризации, на каждом ее шаге проводится расчет критерия качества кластеризации, принимающего максимальное значение при оптимальной кластеризации:

$$U(K_o) = \max_{K=\overline{N,2}} \{ (U_1(K) - U_2(K)) \}, \quad (5)$$

где  $U(K_o)$  – оптимальное значение критерия качества кластеризации;  $U_1(K)$  – компактность классов;  $U_2(K)$  – мера близости классов. Мера сходства между двумя объектами (контрольными точками) определяется на основании потенциальной функции  $f(S_i, S_j)$ :

$$f(S_i, S_j) = \frac{1}{1 + \rho^2(S_i, S_j)}, \quad (6)$$

$$\rho(S_i, S_j) = \sqrt{\sum_{m=1}^M (X_{im} - X_{jm})^2},$$

где  $f(S_i, S_j)$  – потенциальная функция объектов  $S_i \in S$  и  $S_j \in S$ ;  $\rho(S_i, S_j)$  – евклидово расстояние между объектами  $S_i$  и  $S_j$  в пространстве характеристик  $X$ .

Для решения задачи кластеризации, также можно использовать методы средней связи и Уорда, описываются следующими выражениями:

для метода средней связи:

$$F_p(C_i, C_j) = \max_{k=\overline{1, K}} \max_{l=\overline{1, K}} \{ F(C_k, C_l) \}, \quad k \neq l, \quad K = \overline{N, 2}, \quad (7)$$

где  $F_p(C_i, C_j)$  – максимальная мера близости двух классов объектов  $C_i$  и  $C_j$ , объединяемых в один класс на шаге  $p$ ;  $K$  – количество классов объектов на шаге  $p$ ;

для метода Уорда:

$$V_p(C_i, C_j) = \min_{k=\overline{1, K}} \min_{l=\overline{1, K}} \{ V(C_k, C_l) \}, \quad k \neq l, \quad K = \overline{N, 2}, \quad (8)$$

$$V(C_k, C_l) = \sum_{S_i \in S_{kl}} \sum_{m=1}^M (X_{S_i, m} - \bar{X}_{m, S_{kl}})^2, \quad S_{kl} = C_k \cup C_l,$$

где  $V_p(C_i, C_j)$  – минимальная сумма квадратов отклонения для двух классов объектов;  $C_i$  и  $C_j$ , объединяемых в один класс на шаге  $p$ ;  $V(C_k, C_l)$  – сумма квадратов отклонения для двух объединяющихся классов объектов  $C_k$  и  $C_l$ ;  $X_{S_i, m}$  – значение  $m$ -ой характеристики

$S_i$ -ого объекта;  $\overline{X}_{ms_{kl}}$  – среднее значение  $m$ -ой характеристики в множестве  $S_{kl}$ ;  $S_{kl}$  – множество объектов, получаемое в результате объединения классов  $C_k$  и  $C_l$ ;  $K$  – количество классов объектов на шаге  $p$ .

На каждом шаге кластеризации для определения оптимального значения критерия качества кластеризации производится расчет компактности классов  $U_1(K)$  и меры близости классов  $U_2(K)$ :

$$U_1(K) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{2}{N_k(N_k - 1)} \sum_{S_i \in C_k} \sum_{S_j \in C_k} f(S_i, S_j), \quad i \neq j, \quad (9)$$

где  $K$  – количество классов на текущем шаге кластеризации;  $C_k$  –  $k$ -ый класс объектов;  $N_k$  – количество объектов в классе  $C_k$ ;  $f(S_i, S_j)$  – потенциальная функция объектов  $S_i$  и  $S_j$ .

$$U_2(K) = \frac{2}{K(K - 1)} \sum_{C_k \in C_p} \sum_{C_l \in C_p} F(C_k, C_l), \quad k \neq l, \quad (10)$$

где  $C_p$  – множество классов объектов на текущем шаге кластеризации;  $F(C_k, C_l)$  – мера близости двух классов  $C_k$  и  $C_l$ .

Возможно использование метода кластеризации, предложенного Тамурой С., Хигути С. и Танакой К. Однако, стоит отметить, что результаты, полученные с помощью данного алгоритма, могут быть искажены в силу того, что применяемая в алгоритме операция (max-min)-транзитивного замыкания в некоторой степени изменяет геометрическую структуру исследуемой совокупности объектов. Исходя из этого, данный алгоритм можно рекомендовать только в качестве инструмента предварительного анализа исследуемой совокупности объектов.

С целью получения более качественных результатов обработке подвергались столбцы с номерами 6-13 таблицы 1, в нашем случае метрика будет состоять из 8 элементов. За основной критерий принимались модуль основности  $Mосн$  проб, который влияет на гидравлическую активность металлургического шлака. При этом считалось, что все характеристики метрики одинаково важными, при этом  $Mr(i) = 1/8 = 0.125$  для любого  $i$ .

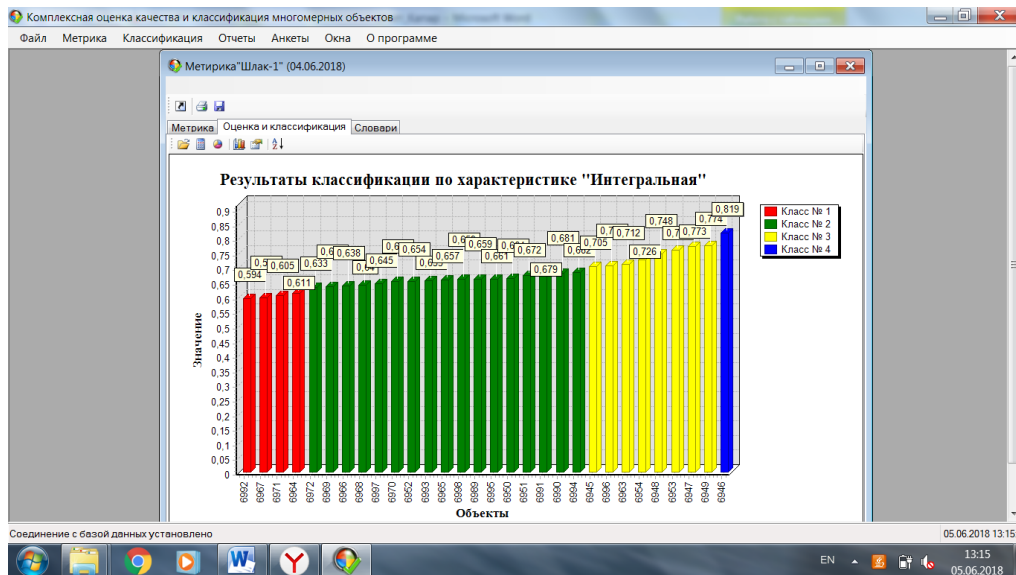


Рисунок 1 – Результаты кластеризации по интегральному критерию

Данные Таблицы 1 были обработаны с применением программного продукта «Комплексная оценка качества и классификация многомерных объектов» [11].

Как мы видим из (рис.1), в результате все объекты распределены на четыре кластера. Из файла «Результаты кластеризации» программного продукта «Комплексная оценка качества и классификация многомерных объектов», разработанного на применении различных методов кластерного анализа, формируется таблица 2 (описание работы программного продукта в данной статье не рассматривается).

Таблица 2. Распределение объектов по кластерам.

№	Объекты	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4
1	6992	0,59			
2	6967	0,60			
3	6971	0,61			
4	6964	0,61			
5	6972		0,63		
6	6969		0,63		
7	6966		0,64		
8	6968		0,64		
9	6997		0,64		
10	6970		0,65		
11	6952		0,65		
12	6993		0,65		
13	6965		0,66		
14	6998		0,66		
15	6989		0,66		
16	6995		0,66		
17	6950		0,66		
18	6951		0,67		
19	6991		0,68		
20	6990		0,68		
21	6994		0,68		
22	6945			0,70	
23	6996			0,71	
24	6963			0,71	
25	6954			0,73	
26	6948			0,75	
27	6953			0,76	
28	6947			0,77	
29	6949			0,77	
30	6946				0,82

В колонках класс1, класс2, класс3, класс4 для каждого объекта представлены интегральные оценки.

**Анализ результатов исследования.** В результате работы программного продукта «Комплексная оценка качества и классификация многомерных объектов» были сформированы кластеры. Для каждого кластера (см. таблицы 2, 3, 4) получены средние, максимальные, минимальные и среднеквадратические оценки отклонения значения показателей.

Таблица 2 – Оценки показателей объектов первого кластера

Имя объекта	Feоб	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	S	осн
6992	0,2	29	0,4	53	6,9	1,5	0,8	1,8
6967	0,3	24,4	0,3	56	7,1	1,3	0,8	2,3
6971	0,4	25,9	0,4	53	6,3	1,1	1	2,1
6964	0,3	24	0,4	56	6,6	0,9	1	2,3
Среднее	0,3	25,8	0,4	54	6,7	1,2	0,9	2,1
MAX	0,4	29	0,4	56	7,1	1,5	0,9	2,3
MIN	0,2	24	0,3	53	6,3	0,9	0,8	1,8
СКО	0,08	2,27	0,05	1,83	0,30	0,26	0,12	0,24

Таблица 3 – Оценки показателей объектов третьего кластера

Имя объекта	Feоб	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	S	осн
6945	3,9	24,9	0,5	46	9,2	4	0,4	1,8
6996	2,3	28,8	0,4	53	6,8	5,1	0,6	1,8
6963	0,3	30,2	0,6	53	7,5	1,5	1	1,8
6954	3,1	26,8	0,6	52	6,8	2,5	1	2
6948	4,9	27,1	0,6	50	6,8	2,9	0,8	1,9
6953	5,7	26,1	0,4	49	9,6	3,8	0,5	1,9
6947	3,7	26,5	0,6	50	9,2	3,9	0,8	1,9
6949	4,8	23,4	0,6	47	7,4	4	0,9	2
Среднее	3,59	26,73	0,54	50	7,91	3,46	0,75	1,89
MAX	5,7	30,2	0,6	50	9,6	5,1	0,9	2
MIN	0,3	23,4	0,4	47	7,4	1,5	0,4	1,8
СКО	1,71	2,12	0,09	2,64	1,21	1,60	0,23	0,08

Таблица 4 – Оценки показателей объектов второго кластера

Имя объекта	Feоб	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	S	осн
6972	0,5	27,8	0,5	54	6,3	1	1,1	2
6969	1,3	27,2	0,7	52	6,8	2,5	0,4	1,9
6966	0,7	25,8	0,4	55	7,8	3,1	0,5	2,2
6968	1,5	25,4	0,6	54	6,8	2,8	0,4	2,1
6997	1,2	27,3	0,6	57	6,3	1,7	0,7	2,1
6970	1,4	27,1	0,7	54	7,1	2,7	0,4	2

6952	1,4	27,8	0,5	52	6,2	1,9	1	1,9
6993	0,3	30,2	0,6	53	7,5	1,5	1	1,8
6965	0,3	26,2	0,5	58	6,9	0,9	1,2	2,2
6998	0,3	26,6	0,5	59	6,6	1	1,2	2,2
6989	0,6	26	0,5	58	7	1,6	1	2,2
6995	1,6	27,2	0,7	53	6,7	3,1	0,4	2
6950	1,7	27,4	0,6	51	6,6	2,4	0,8	1,9
6951	2	27,6	0,6	51	6,8	2,7	0,7	1,9
6991	0,5	29,4	0,8	52	7,6	1,5	1	1,8
6990	0,4	27,2	0,6	59	6,8	1,1	1,2	2,2
6994	1,6	27,6	0,6	54	6,7	3,1	0,7	2
Среднее	1,0	27,3	0,6	54	6,9	2,0	0,7	2,0
MAX	1,7	30,2	0,8	59	7,8	3,1	1,2	2,2
MIN	0,30	25,40	0,40	51	6,20	0,90	0,40	1,80
СКО	0,59	1,19	0,10	2,79	0,45	0,81	0,31	0,14

**Заключение.** В настоящей статье показана методика обработки информации о показателях качества металлургического шлака (техногенного сырья) с целью определения кластеров объектов с близкими параметрами, определяющие параметры дальнейшей обработки, характерные для каждого кластера, с применением различных методов кластерного анализа.

Анализируя полученные статистические данные металлургических шлаков ПФ ТОО «Кастинг» с использованием методов кластерного анализа, принимаем, что в пробах относящихся к 1 кластеру модуль основности  $M_{осн}$  по значению, выше чем у проб относящихся к кластеру 2 и 3 кластеру (относятся к основным шлаки  $M_{осн} > 1$ ), соответственно и показатель коэффициента качества  $K$  проб выше, что повышает гидравлическую активность металлургического шлака и позволяет нам использовать металлургические шлаки(техногенные отходы) в месте отбора проб шлакоотвала 1 кластера для производства строительных материалов с высокими качественными характеристиками. Нами были изучены и проведен анализ работ связанных с использованием металлургических шлаков(техногенных отходов) в строительных материалах [12,13,14].

По результатам анализа работ связанных с использованием металлургических шлаков(техногенных отходов строительных материалах)[6], а также оценкой качества металлургического шлака ПФ ТОО «Кастинг» отобранного с использованием программного продукта «Комплексная оценка качества и классификация многомерных объектов», нами были разработаны эффективные рецептуры тяжелых бетонных смесей, соответствующие требованиям ГОСТ[15,16], произведена опытная партия строительных изделий(камень пустотелый стеновой), поданы документы на получения патента и на сертификацию готовой продукции.

Настоящая публикация осуществлена в рамках Подпроекта №APP-SSG-17/0290P «Инновационные технологии использования твердых техногенных отходов предприятий теплоэнергетики и металлургии Павлодарской области в производстве строительных материалов», финансируемого в рамках Проекта «Стимулирование продуктивных

инноваций», поддерживаемого Всемирным Банком и Правительством Республики Казахстан.

### Литература

1. Гиндис Я.П. Технология переработки шлаков. – М.: Стройиздат, 1991. – 280 с.
2. Барышников В.Г. и др. Вторичные материальные ресурсы черной металлургии. В 2т. Т2 // М.: Экономика, 1986. – 344 с.
3. Мусин В.Г. Состав и свойства смешанных вяжущих на основе металлургических шлаков и полимерных добавок // Строительные материалы. – 1991. – №2. – С. 7–8.
4. Bellman F. Activation of blast furnace slag by a new method / F. Bellmann, J. Stark // Cem. and Concr. Res. – 2009. – Vol.39. – N8. – P. 644–650.
5. Александров С.Е., Грызлов В.С и Фараонова К.Н. Гранулированные конверторные шлаки в производстве строительного материала. Строительные материалы. – 1973. №3. С.41-52.
6. Акишев К.М., Арынгазин К.Ш. Анализ разработок использования техногенных отходов в строительных материалах // Материалы международной научной конференции молодых ученых, магистрантов, студентов и школьников «XIX Саптаевские чтения», (Павлодар, апрель 2019) Павлодар. Издательство Павлодарского государственного университета, 2019, том 20. – С. 249–255.
7. Kodama K. Study on utilization of blast-furnace slag in Concrete Transaction of Japan Society of Civil Engineers, vol.12, November 1981, P.p.278–279.
8. Иванова В.Н., Карпов В.И., Сидоренко Ю.И., Жученко Н.А. Задача кластеризации генотипов в системе поддержки принятия решений при управлении персонализированным питанием, в сб. научных трудов XXI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2018). Сборник докладов в 2-х томах. Санкт-Петербург. 23–25 мая 2018 г. СПб.: СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», 2018 г., том 2, 303–307 с.
9. Миркин Б.Г.. Методы кластерного анализа для поддержки принятия решений, 2011. – 75 с.
10. Айдинян А.Р., Цветкова О.Л.. Алгоритмы кластерного анализа для решения задач с асимметричной мерой близости. Сиб. журнал. выч. мат., 2018, том 21, №2. – С.127–138.
11. «Комплексная оценка качества и классификация многомерных объектов» Свид. об офиц. регистр. прог. для ЭВМ № 2006613936 РФ; Мышенков К.С., Карпов В.И., Гетьман В.В. – №2006613704; Заяв. 02.11.2006; Зарегистр. 16.11.2006.
12. Баженов Ю.М. Способы определения состава различных видов бетона. Учебное пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1975. – 268 с.
13. Батдалов М.М., Гасанов, Р.И и Вишталов В.Х. Разработка технологии высокопрочных бетонов путем направленного конструирования модифицированной структуры с применением термомеханической активации // Строит. матер., оборуд., технол. XXI в. – 2004. – № 5. – С. 69.
14. Родионов Р.Б. Инновационные нанотехнологии для строительной отрасли / Р.Б. Родионов // Строит. матер., оборуд., технол. XXI в. – 2006. – №10. – С. 57–59.
15. ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие требования.
16. ГОСТ 10180-2012. Методы контроля прочности по контрольным образцам.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

---

УДК 519.3:62-50

10.5281/zenodo.3594797

*Ж.Ш. Шаршеналиев, Т.П. Самохвалова*

*Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР*

### ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ БЕЛЛМАНА В ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НАГРЕВА

Предложен новый способ построения приближенного управления с обратной связью, основанный на методе характеристик Н. Гюнтера и методе дополнительного аргумента. Построена автоматизированная обратная связь в методе принципа максимума Л. Понтрягина.

*Ключевые слова:* оптимальное управление; обратная связь; динамическое программирование Р. Беллмана; принципа максимума Л. Понтрягина; метод характеристик и дополнительного аргумента; высокотемпературный нагрев; скачки управления.

**1. Введение.** В данной статье приведен краткий обзор результатов исследований, проводимых в лаборатории «Оптимальные и цифровые системы управления» Института автоматизации и информационных технологий НАН КР по разработке алгоритмов оптимального и стабилизирующего управления процессами нагрева объектов, описываемых уравнениями в частных (DPS) или обыкновенных производных (LPS). Рассмотрены несколько видов минимизируемых критериев качества, для них по методике А.И. Егорова [1, 2] выведены соответствующие уравнения Беллмана. В дальнейших исследованиях использованы идеи работ В.И. Зубова, Н.М. Гюнтера, М.И. Иманалиева, С.Н. Алексеенко, Л.С. Понтрягина, Ж.-Л. Лионса и др. [3–6].

Для математических моделей DPS со степенными нелинейностями предложены новые формы решения полученных уравнений Беллмана в виде бесконечных функционально-интегральных степенных рядов. Получены соответствующие бесконечные системы Риккати [7–9]. В период после публикации работы [7] получены следующие результаты. В решениях полученных бесконечных систем Риккати выявлено и обосновано наличие интервалов стационарности, по которым построены стабилизирующие алгоритмы управления с обратной связью в LPS и DPS [8, 9].

Далее предложен новый способ построения приближенного решения функционального уравнения Беллмана и соответствующего управления в LPS, основанный на методе характеристик Н. Гюнтера [3] и методе дополнительного аргумента [4, 5 и др.], который разрабатывается в Институте математики НАН КР.

В работах [10, 11] в LPS на стыке методов динамического программирования Беллмана, метода параметризации и характеристик [3] и дополнительного аргумента [4, 5] для одномерной модели нагрева с излучением тепла начата разработка нового способа приближенного решения уравнения Беллмана и соответствующего способа расчета управления с обратной связью. В линейной задаче удалось увидеть явную зависимость управления от параметров модели и критерия качества, в том числе от желаемого состояния процесса.



Компьютерное моделирование выполнено для процессов высокотемпературного нагрева, для которых свойственны резкие скачки расчетной величины управления. В работе [12] предложен способ выбора параметров, обеспечивающих уменьшение или устранение резких скачков величины управления с обратной связью в одномерной модели с периодическим измерением текущего состояния процесса.

В работах [13, 14] продолжена верификация предложенного способа расчетов, разработана автоматизированная неявная обратная связь в методе принципа максимума Л.С. Понтрягина при периодическом измерении текущего состояния управляемого процесса с одномерной моделью в обыкновенных производных. В перспективе, возможно, предложенный в [14] способ расчетов управления будет применен для DPS.

О связи методов принципа максимума и динамического программирования говорится в работах Л.И. Розоноэра [15]. Отметим, что в книге А.А. Фельдбаума, А.Г. Бутковского [16] сказано, что в работах Л.И. Розоноэра впервые была установлена связь принципа максимума с динамическим программированием. Из методических соображений в [16] приведен вывод соотношений принципа максимума Л.С. Понтрягина из динамического программирования Р. Беллмана.

В книге [6] показан сложный аналитический переход между формулами управляющей функции в методах принципа максимума Л.С. Понтрягина и динамического программирования Р. Беллмана.

### 1. Скачки управления в DPS

Пусть процесс изменения температуры в однородном тонком стержне описывается уравнением

$$\frac{\partial u(t, x)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial x^2} + q(x)p(t), \quad t \in [0, T], \quad 0 \leq x \leq 1, \quad (1.1)$$

с начальными и граничными условиями

$$u(0, x) = u_0(x), \quad \frac{\partial u(t, 0)}{\partial x} = 0, \quad \lambda \frac{\partial u(t, 1)}{\partial x} = \alpha(T_c - u(t, 1)).$$

Известно, что при нагреве при температуре выше 660°C поликремний начинает светиться, и в моделировании используется закон Стефана-Больцмана об излучении тепла с поверхности стержня. Граничное условие на правом конце стержня принимает вид

$$u(0, x) = u_0(x), \quad \frac{\partial u(t, 0)}{\partial x} = 0, \quad \lambda \frac{\partial u(t, 1)}{\partial x} = \alpha(T_c - u(t, 1) - \gamma \sigma u^4(t, 1)). \quad (1.2)$$

Здесь  $u(t, x)$  – температура стержня в момент времени  $t$  в точке « $x$ »; функции  $q(x), u_0(x) \in L_2(0, 1)$ ;  $a, \lambda, \alpha, T$  – заданные постоянные;  $T_c$  – температура окружающей среды;  $p(t)$  – управляющая функция из класса допустимых,  $p(t) \in L_2(0, T)$ ;  $\sigma$  – постоянная Больцмана, коэффициент интегральной излучательной способности кремния;  $\gamma$  – вспомогательный множитель.

Под решением краевой задачи (1.1), (1.2) понимается обобщенное решение в смысле В.И. Плотникова, используемое в [1].

Минимизируемый критерий качества управления запишем в виде:

$$J = \xi_1 \int_0^T [u(t, 1) - g]^2 dt + \xi_2 [u(T, 1) - g]^2 + \beta \int_0^T p^2(t) dt, \quad (1.3)$$

где  $\xi_1, \xi_2, g \geq 0, \beta > 0$  – заданные постоянные,  $\xi_1, \xi_2$  не равны нулю одновременно.

*Задача 1.1.* Найти синтезирующее управление  $p^0(t) = p^0(t, u(t, x))$  и соответствующее решение  $u(t, x) \in W_2^{1,1}$  уравнения (1.1) с условиями (1.2), доставляющие мини-

мальное значение критерию качества (1.3).

Управление  $p^0(t, u)$  будем называть оптимальным относительно критерия (1.3).

Решаем задачу 1.1 с помощью методики [1, 7-9]. Уравнение Беллмана имеет вид:

$$-\frac{\partial S(t, u)}{\partial t} = \xi_1 [u(t, 1) - g(t, 1)]^2 - \frac{a\alpha_5}{\alpha_4} u(t, 1)v(t, 1) - \frac{1}{4\beta} \left( \int_0^1 q(x)v(t, x)dx \right)^2 - \gamma\sigma \frac{a\alpha_7}{\alpha_4} u^4(t, 1)v(t, 1). \quad (1.4)$$

Решение функционального уравнения (1.4) будем искать в виде бесконечного степенного ряда  $S(t, x) = \sum_{i=0}^{\infty} k_i(t)u^i(t, 1)$ . Получаем функциональную производную

$$v(t, x) \text{ функционала } S(t, u) \text{ по } u(t, x): v(t, x) = \sum_{i=1}^{\infty} ik_i(t)u^{i-1}(t, 1).$$

Оптимальное синтезирующее управление в задаче 1.1 равно

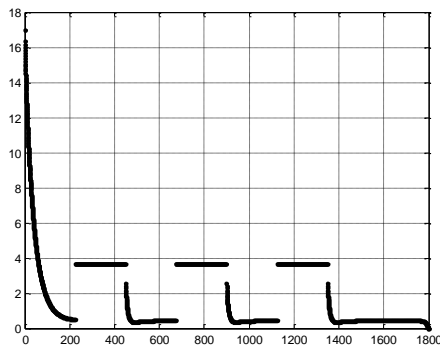
$$p^0(t) = -\frac{1}{2\beta} \int_0^1 q(x) dx \sum_{i=1}^{\infty} ik_i(t)u^{i-1}(t, 1). \quad (1.5)$$

Следуя идее Р. Калмана для линейных задач в LPS, по (1.5) построим алгоритм управления для нелинейной задачи в DPS:

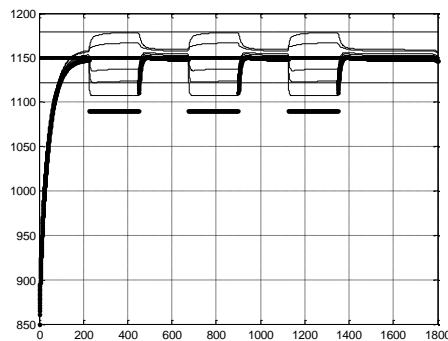
$$\bar{p}(t) = -\frac{1}{2\beta} \int_0^1 q(x) dx \sum_{i=1}^{\infty} ik_i u^{i-1}(t, 1), \quad (1.6)$$

где  $\bar{k}_i$  – стационарные значения вспомогательных функций Риккати  $k_i(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots$

*Пример 1.1* [8, 9]. Температура вдуваемой в реактор рабочей смеси  $T_c = 1090^\circ C$ , интервал времени управления  $T = 1800 \text{сек}$ , интервал периодического вдувания смеси  $\Delta = T/8$ , желаемая температура  $g = 1150$ . Получили графики, приведенные на рис. 1.1. Выявлены скачки величины управления а). Температура поверхности и нескольких прилегающих слоев резко падает до  $1090^\circ C$ , затем возвращается в 5%-ую зону от  $1150^\circ C$ . Температура центра не выходит выше 5%-ой зоны б). Такой режим вдувания смеси соответствует технологическим требованиям не превышать центру стержня верхнюю границу 5%-ой зоны. Управление  $p(t)$  характеризует удельную мощность электрического тока, пропускаемого через стержень. Возникает задача уменьшить или устранить скачки управления.



а)



б)

Рисунок 1.1 – Управление  $p_n(t)$  а) и температура  $u(t, x_j)$  б) при периодическом вдувании смеси,  $T_c = 1090^\circ C$

## 2. Скачки управления в LPS

Пример 2.1 [10–14]. Рассмотрим модель нагрева в обыкновенных производных

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bp(t) - \gamma\sigma x^4(t), \quad x(0) = x_0, \quad t \in [0; t_k]. \quad (2.1)$$

В численных расчетах для удовлетворительного достижения заданного желаемого состояния  $g(t)$  объекта (2.1) используем минимизацию квадратичного критерия

$$J_k = \gamma_1 \int_0^{t_k} (x(t) - g)^T Q(x(t) - g) dt + \gamma_2 (x(t_k) - g)^T F(x(t_k) - g) + \beta \int_0^{t_k} p^2(t) dt. \quad (2.2)$$

Линеаризованное уравнение Беллмана для (2.1), (2.2) при  $n=1$ ,  $\gamma=0$ ,  $A < 0$  запишем в виде

$$\frac{\partial S(t, x)}{\partial t} - Ax \frac{\partial S(t, x)}{\partial x} = \left( \gamma_1 Q - \frac{B^2}{\beta} \gamma_2^2 F^2 \right) (x - g)^2, \quad S(0, x) = \gamma_2 F(x - g)^2. \quad (2.3)$$

Приближенное стабилизирующее управление  $p(x(t))$ , полученное из (2.3) по методу характеристик и дополнительного аргумента с линеаризацией уравнения Беллмана, имеет вид [10,11]:

$$p(x(t)) = -\frac{b}{2A\beta} Mx(t) + \frac{Bg(t)}{A\beta} M, \quad M = \gamma_1 Q - \frac{B^2}{\beta} \gamma_2^2 F^2. \quad (2.4)$$

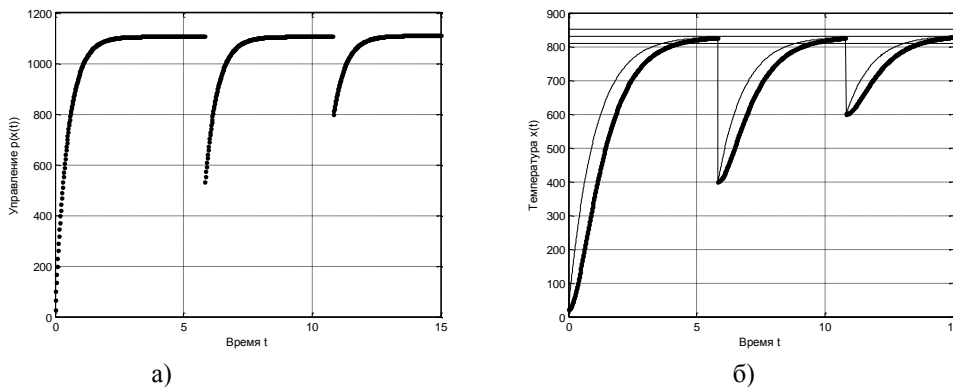


Рисунок 2.1 – Управление (2.4)  $p(t)$  а) и температура (2.1)  $x(t)$  б) при периодическом измерении

## Заключение

Для задач оптимального управления процессами нагрева в LPS и DPS с тремя типами управлений ( $p(t)$ ,  $p(t, x)$  в уравнении модели объекта,  $p(t)$  в граничном условии) с полиномиальными нелинейностями предложены несколько видов минимизируемых критериев качества. Модифицирована форма решения уравнения Беллмана. В решениях бесконечных систем Риккати выявлены интервалы стационарности, доказано, что эти стационарные величины являются приближениями к горизонтальным асимптотам решений, эти величины применены к построению приближенных стабилизирующих алгоритмов управлений с обратной связью.

Разработан еще один способ решения уравнения Беллмана в одномерной LPS, основанный на методе характеристик и дополнительного аргумента. Это позволило в рассмотренных примерах с желаемой величиной в виде гладкой функции уменьшить или

устранить резкие скачки величины управления с обратной связью при измерении текущего состояния объекта в высокотемпературном нагреве.

Разработана автоматизированная обратная связь в методе принципа максимума Л.С. Понтрягина при периодическом измерении текущего состояния управляемого одномерного процесса.

### *Литература*

1. Егоров А.И. Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами. М.: Наука, 1978. 463 с.
2. Егоров А.И. Основы теории управления. М.: Физматлит, 2004. 504 с.
3. Гюнтер Н.М. Интегрирование уравнений в частных производных первого порядка. Л.-М.: ОНТИ, 1934.
4. Иманалиев М.И. Нелинейные интегро-дифференциальные уравнения с частными производными. Бишкек: Илим, 1992. 112 с.
5. Иманалиев М.И., Алексеенко С.Н. // Доклады АН СССР. 1992. Т. 323. № 3. С. 410–414; 1992. Т. 325. № 6. С. 111–115; 1993. Т. 329. № 5. С. 543–546.
6. Лионс Ж.-Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными. М.: Мир, 1972. 416 с.
7. Мамытов Дж., Самохвалова Т.П., Шаршеналиев Ж. Оптимизация температуры стержней поликремния // Автоматика и телемеханика. 2008. № 5. С. 91–100; Automation and Remote Control. 2008. Vol. 69, No. 5. P. 819–827.
8. Шаршеналиев Ж.Ш., Самохвалова Т.П., Сактанов У.А. Моделирование и оптимизация управляемых технологических процессов. Бишкек: Илим, 2009. 242 с.
9. Шаршеналиев Ж.Ш., Самохвалова Т.П. Приближенные алгоритмы управления и стабилизации в системах с сосредоточенными и распределенными параметрами // Итоги науки. Том 2. Избранные труды Международного симпозиума по фундаментальным и прикладным проблемам науки». М.: РАН, 2014. С. 75–110.
10. Самохвалова Т.П. Приближенное решение уравнения Беллмана методом характеристик // Проблемы автоматизации и управления. 2016. № 2 (31). С. 51–56.
11. Самохвалова Т.П. Приближенное решение уравнения Беллмана / Материалы Международной научной конференции «Механика твердых, жидких и газообразных сред», посвященной 80-летию д.ф.-м.н., проф. Я.И. Рудаева. Бишкек, 2–3 декабря 2016г. // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2017. Т. 17, № 1. С. 52–54.
12. Шаршеналиев Ж.Ш., Самохвалова Т.П., Макиенко Д.О. Алгоритм управления с периодическим контролем состояния объекта // Проблемы автоматизации и управления. 2017. № 2 (33). С. 3–9.
13. Шаршеналиев Ж.Ш., Самохвалова Т.П., Третьякова Л.В. Алгоритм стабилизации высокотемпературных режимов объекта // Проблемы автоматизации и управления. 2018. № 1 (34). – С. 5–11.
14. Самохвалова Т.П. Приближенный алгоритм управления высокотемпературным нагревом // Материалы XIV Международной Азиатской Школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем». 20-31 июля 2018 г. Кыргызская Республика, оз. Иссык-Куль, пансионат «Отель Евразия». Алматы: 2018. Труды конф. Ч. 2. С. 182–192.
15. Розоноэр Л.И. Принцип максимума Л.С. Понтрягина в теории оптимальных систем // Автоматика и телемеханика. 1959. №№ 10 – 12.
16. Фельдбаум А.А., Бутковский А.Г. Методы теории автоматического управления. М.: Наука, 1971. 744 с.

**Ж.Н. Кутунаев**, [zh.kutunaev@mail.ru](mailto:zh.kutunaev@mail.ru)

Ошский технологический университет им.акад.М.М.Адышева, г.Ош

## ФУНКЦИОНАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ В МОДЕЛИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

В статье рассматривается уравнение гиперболического типа с функционально-дифференциальным граничным условием, частными случаями которого являются многие другие уравнения, встречающиеся в прикладных технических и инженерных науках.

**Ключевые слова:** уравнение гиперболического типа, интегро-дифференциальное уравнение, струны, начальное и граничное условия, колебательные процессы, математическое моделирование, поперечные колебания.

**Введение.** Математическое моделирование колебательных процессов актуально в современной технике, механике, физике и т.д., так как большое количество технологических процессов носит колебательный характер. В данной работе рассматривается поперечные колебания длинной струны, которые описываются линейным уравнением в частных производных гиперболического типа с переменными коэффициентами. Особенностью модели процесса является то, что граничные условия имеют сложный характер, а именно, в них содержится несколько коэффициентов и в силу некоторых предположений отсутствует начальное условие для функции  $u(x, t)$ , описывающей колебания. Предложен способ построения явного вида решения краевой задачи [1–2].

**Постановка задачи.** Рассмотрим задачу о распространении волн на полуограниченной прямой  $x \geq 0$ . Как известно, процесс колебаний полуограниченной прямой зависит от граничного условия, от ее начальной формы  $u(x, 0)$  и распределения скорости  $u_t(x, 0)$  в начальный момент времени [3].

Если в начальный момент времени полуограниченной прямой занимает произвольное положение, а начальный импульс равен нулю, то ясно, что колебание осуществляется только за счет граничного режима.

Рассмотрим следующую задачу: найти решение уравнения колебаний

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left( \frac{(Cx + D)^2}{AD - BC} \right)^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad 0 < x < \infty, t > 0, \quad (1)$$

удовлетворяющее граничному условию

$$a_1 u_{tt}(0, t) + a_2 u_t(0, t) + a_3 u_x(0, t) + a_4 u(0, t) = M \sin \omega t + N \cos \omega t \quad (2)$$

и начальному условию

$$u_t(x, 0) = 0, \quad 0 < x < \infty, \quad t > 0, \quad (3)$$

где  $a_1, a_2, a_3, a_4$  – постоянные коэффициенты.

В [2] показано, что уравнения (1) допускают общее решение вида

$$u(x, t) = (Cx + D) \left( f \left( \frac{Ax + B}{Cx + D} + t \right) + g \left( \frac{Ax + B}{Cx + D} - t \right) \right), \quad (4)$$

где  $A, B, C, D$  – произвольные постоянные,  $f$  и  $g$  – произвольные, дважды непрерывно дифференцируемые функции. Эта функция удовлетворяет начальному условию (3), если ее выберем в виде

$$u(x, t) = (Cx + D) \left( f \left( \frac{Ax + B}{Cx + D} + t \right) + f \left( \frac{Ax + B}{Cx + D} - t \right) \right). \quad (5)$$

Дифференцируя (5) по  $t$  и по  $x$  и подставляя полученные результаты в (2), получаем

$$\begin{aligned} & a_1 D \left( f'' \left( \frac{B}{D} + t \right) + f'' \left( \frac{B}{D} - t \right) \right) + a_2 D \left( f' \left( \frac{B}{D} + t \right) + f' \left( \frac{B}{D} - t \right) \right) + \\ & + a_3 \left\{ C \left[ f \left( \frac{B}{D} + t \right) + f \left( \frac{B}{D} - t \right) \right] + \frac{AD - BC}{D} \left[ f' \left( \frac{B}{D} + t \right) + f' \left( \frac{B}{D} - t \right) \right] \right\} + \\ & + a_4 \left[ f \left( \frac{B}{D} + t \right) + f \left( \frac{B}{D} - t \right) \right] = M \sin \omega t + N \cos \omega t, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} & a_1 D f'' \left( \frac{B}{D} + t \right) + \left( a_2 D + \frac{a_3 (AD - BC)}{D} \right) f' \left( \frac{B}{D} + t \right) + (a_3 C + a_4 D) f \left( \frac{B}{D} + t \right) + \\ & + a_1 D f'' \left( \frac{B}{D} - t \right) + \left( \frac{a_3 (AD - BC)}{D} - a_2 D \right) f' \left( \frac{B}{D} - t \right) + (a_3 C + a_4 D) f \left( \frac{B}{D} - t \right) = \\ & = M \sin \omega t + N \cos \omega t. \end{aligned}$$

Для краткости введем следующее обозначения:

$$p_1 = a_2 D + \frac{a_3 (AD - BC)}{D}, \quad q_1 = \frac{a_3 (AD - BC)}{D} - a_2 D, \quad p_2 = q_2 = (a_3 C + a_4 D).$$

Тогда имеем следующее функционально-дифференциальное уравнение:

$$\begin{aligned} & a_1 D f'' \left( \frac{B}{D} + t \right) + p_1 f' \left( \frac{B}{D} + t \right) + p_2 f \left( \frac{B}{D} + t \right) + a_1 D f'' \left( \frac{B}{D} - t \right) + q_1 f' \left( \frac{B}{D} - t \right) + q_2 f \left( \frac{B}{D} - t \right) = \\ & = M \sin \omega t + N \cos \omega t. \end{aligned} \quad (6)$$

Как известно, общее решение вида (6) можно представить в виде [2]

$$f(t) = \bar{f}(t) + F(t),$$

где  $\bar{f}(t)$  – общее решение однородного уравнения,  $F(t)$  – какое-нибудь частное решение неоднородного уравнения (6).

Сначала решим однородное уравнение

$$a_1 D f'' \left( \frac{B}{D} + t \right) + p_1 f' \left( \frac{B}{D} + t \right) + p_2 f \left( \frac{B}{D} + t \right) + a_1 D f'' \left( \frac{B}{D} - t \right) + q_1 f' \left( \frac{B}{D} - t \right) + q_2 f \left( \frac{B}{D} - t \right) = 0. \quad (7)$$

Решение уравнение (7) будем искать в виде [4]:

$$f(t) = e^{mt} + ke^{nt}, \quad (8)$$

где  $m, n, k$  – постоянные числа, подлежащие определению.

Подставляя (8) в (7) и положив  $m + n = 0$ , получаем

$$a_1 D \left( m^2 e^{m \left( \frac{B}{D} + t \right)} + kn^2 e^{n \left( \frac{B}{D} + t \right)} \right) + p_1 \left( me^{m \left( \frac{B}{D} + t \right)} + kne^{n \left( \frac{B}{D} + t \right)} \right) + p_2 \left( e^{m \left( \frac{B}{D} + t \right)} + ke^{n \left( \frac{B}{D} + t \right)} \right) + \frac{1}{e^{(m+n)t}} \left[ a_1 D \left( m^2 e^{\frac{mB}{D}} e^{nt} + kn^2 e^{\frac{nB}{D}} e^{mt} \right) + q_1 \left( me^{\frac{mB}{D}} e^{nt} + kne^{\frac{nB}{D}} e^{mt} \right) + q_2 \left( e^{\frac{mB}{D}} e^{nt} + ke^{\frac{nB}{D}} e^{mt} \right) \right] = 0,$$

или

$$a_1 D m^2 e^{\frac{mB}{D}} e^{mt} + a_1 D kn^2 e^{\frac{nB}{D}} e^{nt} + p_1 me^{\frac{mB}{D}} e^{mt} + p_1 kne^{\frac{nB}{D}} e^{nt} + p_2 e^{\frac{mB}{D}} e^{mt} + p_2 ke^{\frac{nB}{D}} e^{nt} + a_1 D m^2 e^{\frac{mB}{D}} e^{nt} + a_1 D kn^2 e^{\frac{nB}{D}} e^{mt} + q_1 me^{\frac{mB}{D}} e^{nt} + q_1 kne^{\frac{nB}{D}} e^{mt} + q_2 e^{\frac{mB}{D}} e^{nt} + q_2 ke^{\frac{nB}{D}} e^{mt} = 0.$$

Откуда, приравнявая коэффициенты  $e^{mt}$  и  $e^{nt}$  к нулю, получаем следующую систему уравнений относительно  $m, n$  и  $k$ :

$$\begin{cases} m + n = 0, \\ e^{\frac{mB}{D}} (a_1 D m^2 + p_1 m + p_2) = -ke^{\frac{nB}{D}} (a_1 D n^2 + q_1 n + q_2), \\ e^{\frac{nB}{D}} (a_1 D n^2 + p_1 n + p_2) = -ke^{\frac{mB}{D}} (a_1 D m^2 + q_1 m + q_2). \end{cases}$$

Решая эту систему убеждаемся, что  $m = 0, n = 0, k = -1$  и следовательно [4–5],

$$\bar{f}(t) = e^{mt} + ke^{nt} = 0.$$

Частное решение уравнения (6) будем искать в виде:

$$F(t) = \alpha \sin \omega t + \beta \cos \omega t.$$

Имеем

$$\left. \begin{aligned} F\left(\frac{B}{D} + t\right) &= \alpha \sin \omega \left(\frac{B}{D} + t\right) + \beta \cos \omega \left(\frac{B}{D} + t\right), \\ F'\left(\frac{B}{D} + t\right) &= \alpha \omega \cos \omega \left(\frac{B}{D} + t\right) - \beta \omega \sin \omega \left(\frac{B}{D} + t\right), \\ F''\left(\frac{B}{D} + t\right) &= -\alpha \omega^2 \sin \omega \left(\frac{B}{D} + t\right) - \beta \omega^2 \cos \omega \left(\frac{B}{D} + t\right), \\ F\left(\frac{B}{D} - t\right) &= -\alpha \sin \omega \left(\frac{B}{D} - t\right) + \beta \cos \omega \left(\frac{B}{D} - t\right), \\ F'\left(\frac{B}{D} - t\right) &= \alpha \omega \cos \omega \left(\frac{B}{D} - t\right) + \beta \omega \sin \omega \left(\frac{B}{D} - t\right), \\ F''\left(\frac{B}{D} - t\right) &= -\alpha \omega^2 \sin \omega \left(\frac{B}{D} - t\right) - \beta \omega^2 \cos \omega \left(\frac{B}{D} - t\right). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Подставляя (9) в (6), получаем

$$\begin{aligned} & a_1 \left[ -\alpha \omega^2 \sin \omega \left(\frac{B}{D} + t\right) - \beta \omega^2 \cos \omega \left(\frac{B}{D} + t\right) \right] \\ & \quad + p_1 \left[ \alpha \omega \cos \omega \left(\frac{B}{D} + t\right) - \beta \omega \sin \omega \left(\frac{B}{D} + t\right) \right] + \\ & + p_2 \left[ \alpha \sin \omega \left(\frac{B}{D} + t\right) + \beta \cos \omega \left(\frac{B}{D} + t\right) \right] + a_1 D \left[ \alpha \omega^2 \sin \omega \left(\frac{B}{D} - t\right) - \beta \omega^2 \cos \omega \left(\frac{B}{D} - t\right) \right] + \\ & + q_1 \left[ \alpha \omega \cos \omega \left(\frac{B}{D} - t\right) + \beta \omega \sin \omega \left(\frac{B}{D} - t\right) \right] + q_2 \left[ -\alpha \sin \omega \left(\frac{B}{D} - t\right) + \beta \cos \omega \left(\frac{B}{D} - t\right) \right] = \\ & = M \sin \omega t + N \cos \omega t. \end{aligned}$$

После некоторых вычислений, сравнивая коэффициенты при  $\sin \omega t$  и  $\cos \omega t$ , получаем эти два уравнения для определения  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\left. \begin{aligned} \alpha \left( -2a_1 D \omega^2 \cos \frac{\omega B}{D} - p_1 \omega \sin \frac{\omega B}{D} + p_2 \cos \frac{\omega B}{D} - q_1 \omega \sin \frac{\omega B}{D} + q_2 \cos \frac{\omega B}{D} \right) - \\ - \beta \left( p_1 \omega \cos \frac{\omega B}{D} + p_2 \sin \frac{\omega B}{D} + q_1 \omega \cos \frac{\omega B}{D} - q_2 \sin \frac{\omega B}{D} \right) = M, \\ \beta \left( -2a_1 D \omega^2 \cos \frac{\omega B}{D} - p_1 \omega \sin \frac{\omega B}{D} + p_2 \cos \frac{\omega B}{D} - q_1 \omega \sin \frac{\omega B}{D} + q_2 \cos \frac{\omega B}{D} \right) + \\ + \alpha \left( p_1 \omega \cos \frac{\omega B}{D} + p_2 \sin \frac{\omega B}{D} + q_1 \omega \cos \frac{\omega B}{D} - q_2 \sin \frac{\omega B}{D} \right) = N. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Для краткости введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= -2a_1 D \omega^2 \cos \frac{\omega B}{D} - p_1 \omega \sin \frac{\omega B}{D} + p_2 \cos \frac{\omega B}{D} - q_1 \omega \sin \frac{\omega B}{D} + q_2 \cos \frac{\omega B}{D}, \\ \sigma_2 &= p_1 \omega \cos \frac{\omega B}{D} + p_2 \sin \frac{\omega B}{D} + q_1 \omega \cos \frac{\omega B}{D} - q_2 \sin \frac{\omega B}{D}. \end{aligned}$$

Тогда система (10) примет вид



$$\begin{cases} \sigma_1 \alpha + \sigma_2 \beta = M, \\ \sigma_1 \beta + \sigma_2 \alpha = N, \end{cases}$$

откуда

$$\alpha = \frac{M\sigma_1 + N\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad \beta = \frac{N\sigma_1 - M\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}.$$

Таким образом получим общее решение неоднородного уравнения (6) в виде

$$F(t) = \alpha \sin \omega t + \beta \cos \omega t = \frac{M\sigma_1 + N\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \sin \omega t + \frac{N\sigma_1 - M\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \cos \omega t. \quad (11)$$

**Вывод.** Используя (11), построим теперь искомое решение задачи (1)–(3):

$$\begin{aligned} u(x, t) = (Cx + D) & \left\{ \frac{M\sigma_1 + N\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \sin \left[ \omega \left( \frac{Ax + B}{Cx + D} + t \right) \right] + \frac{N\sigma_1 - M\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \cos \left[ \omega \left( \frac{Ax + B}{Cx + D} + t \right) \right] \right. \\ & + \\ & \left. + \frac{M\sigma_1 + N\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \sin \left[ \omega \left( \frac{Ax + B}{Cx + D} - t \right) \right] + \frac{N\sigma_1 - M\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \cos \left[ \omega \left( \frac{Ax + B}{Cx + D} - t \right) \right] \right\}. \end{aligned}$$

**Пример.** Найти решение (1) – (3) при  $a_1 = a_4 = 0$ ,  $A = C = D = 1, B = 0$ .

**Решение.** В данном случае уравнение (6) имеет вид

$$p_1 f'(t) + p_2 f(t) + q_1 f'(-t) + q_2 f(-t) = M \sin \omega t + N \cos \omega t. \quad (12)$$

Решение уравнения (12) будем искать в виде  $F(t) = \alpha \sin \omega t + \beta \cos \omega t$ . Тогда будем иметь

$$\begin{aligned} p_1(\alpha \omega \cos \omega t - \beta \omega \sin \omega t) + p_2(\alpha \sin \omega t + \beta \cos \omega t) + q_1(\alpha \omega \cos \omega t + \beta \omega \sin \omega t) + \\ + q_2(-\alpha \sin \omega t + \beta \cos \omega t) = M \sin \omega t + N \cos \omega t, \end{aligned}$$

$$\begin{cases} -p_1 \beta \omega + p_2 \alpha + q_1 \beta \omega - q_2 \alpha = M, \\ p_1 \alpha \omega + p_2 \beta + q_1 \alpha \omega + q_2 \beta = N, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha(p_2 - q_2) + \beta \omega(q_1 - p_1) = M, \\ \alpha \omega(p_1 + q_1) + \beta(p_2 + q_2) = N, \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \alpha(p_2 - q_2) - \beta \omega(p_1 - q_1) = M, \\ \alpha \omega(p_1 + q_1) + \beta(p_2 + q_2) = N, \end{cases}$$

$$\alpha = \frac{M(p_2 + q_2) + N(p_1 - q_1)\omega}{(p_2^2 - q_2^2) + (p_1^2 - q_1^2)\omega^2}, \quad \beta = \frac{N(p_2 - q_2) - M(p_1 + q_1)\omega}{(p_2^2 - q_2^2) + (p_1^2 - q_1^2)\omega^2}.$$

В нашем случае  $p_1 = a_2 + a_3$ ,  $p_2 = a_3$ ,  $q_1 = a_3 - a_2$ ,  $q_2 = a_3$  и, следовательно,

$$\alpha = \frac{2a_3 M + 2a_2 N \omega}{((a_2 + a_3)^2 - (a_3 + a_2)^2)\omega^2} = \frac{a_3 M + a_2 N \omega}{2a_2 a_3 \omega^2}, \quad \beta = -\frac{M}{2a_2 \omega}.$$

Мы нашли  $F(t)$  для примера

$$F(t) = \frac{a_3 M + a_2 N \omega}{2a_2 a_3 \omega^2} \sin \omega t - \frac{M}{2a_2 \omega} \cos \omega t.$$

**Вывод.** Используя найденное  $F(t)$ , построим искомое решение [6]:

$$u(x, t) = (x + 1) \left\{ \frac{a_3 M + a_2 N \omega}{2 a_2 a_3 \omega^2} \sin \left[ \omega \left( \frac{x}{x + 1} + t \right) \right] - \frac{M}{2 a_2 \omega} \cos \left[ \omega \left( \frac{x}{x + 1} + t \right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{a_3 M + a_2 N \omega}{2 a_2 a_3 \omega^2} \sin \left[ \omega \left( \frac{x}{x + 1} - t \right) \right] - \frac{M}{2 a_2 \omega} \cos \left[ \omega \left( \frac{x}{x + 1} - t \right) \right] \right\}.$$

### *Литература*

1. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука. – 1977. –736 с.
2. А.А. Самарский, А.П.Михайлов, Математическое моделирование. –М.: Физматлит, 2005.
3. В.С. Зарубин Математическое моделирование в технике. – М.: Издательство МГТУ им.Н.Э. Баумана.
4. Кутунаев Ж.Н. Обобщенные решения волновых уравнений одного класса // Проблемы автоматизации и управления. – 2019. – №1 (36). – С 141–146.
5. Кутунаев Ж.Н. Решение модельных задач с помощью уравнения гиперболического типа с переменными коэффициентами // Проблемы автоматизации и управления.– 2017. – №1 (32). – С. 11–14.
6. Создание математической модели колебаний струны и ее применение // Известия КГТУ им. И. Раззакова, №2 (46), Бишкек, 2018. – С. 356–360

*А.Дж. Сатыбаев, Г.С. Курманалиева* – аспирант  
Ошский технологический университет им. М.М. Адышева  
[abdu-satybaev@mail.ru](mailto:abdu-satybaev@mail.ru), [gulzat-kurmanalieva@mail.ru](mailto:gulzat-kurmanalieva@mail.ru)

## **ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ДВУМЕРНОЙ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ДЕЙСТВИЙ ПО НЕРВНОМУ ВОЛОКНУ**

В статье изложена двумерная прямая задача, возникающая при распространении потенциала действий по нервному волокну. При этом возникает задача параболического типа и с использованием преобразования Лапласа эта задача приводится к задаче гиперболического типа, которая учитывает и скорость распространения потенциала действий. Построен численный алгоритм решения с применением конечно-разностного метода задачи гиперболического типа. Доказана теорема о сходимости построенного приближенного решения к точному решению.

Задачи гиперболического и параболического типов эквивалентны, следовательно, конечно-разностное решение параболической задачи также сходится к точному решению.

**Ключевые слова.** Двумерная, прямая задача, нервное волокно, потенциал действий, параболическая задача, гиперболическая задача, преобразование Лапласа, метод конечно-разностный, численный алгоритм, приближенное решение, сходимость решения.

**Введение. Обзор.** Потенциал покоя-это разность электрических потенциалов между внутренней и внешней средой клетки.

Потенциал действия – это возбуждение клетки, быстрое колебание мембранного потенциала вследствие диффузии ионов в клетку и из клетку.

Возбуждение происходит при воздействии раздражителя на клетки ткани. Таким образом, в начале активизируются и инактивируются натриевые каналы, а затем калиевые каналы.

Он является специфическим признаком возбуждения. Нервный импульс возникает в любой точке возбудимой мембраны нервного волокна и способен распространяться вдоль поверхности нервного волокна.

Потенциал действия распространяется при перемещении ионов через мембрану нервной клетки и передается из одной нервной клетки в другую с помощью нейромедиаторов.

Нейрон является одним из важных элементов нервной системы.

Нервный импульс, или потенциал действия, исследован в работах [1, 2].

Моделированные био-медэлектрические явления – одно из современных направлений изучения процессов, протекающих в живых элетровозбудимых структурах.

В статьях Е.В. Максименко [3–6] разработана модель изменения транс-мембранного потенциала нервного волокна при распространении по нервному волокну

возбуждения. На основе интегрального преобразования Лапласа и теоремы Эфоса, когда входной импульс возбуждения отклоняется от ступенчатой функции Хевисайда И.Т. Селезавым и др. [7] получено точное аналитическое решение задачи распространения потенциала действия в модели Ходжкина-Хаксли.

Решение задачи нервного импульса по аксону для возбуждающего импульса произвольной формы исследовано в [8], а в статье [9] проведен анализ изменения формы нервного импульса.

### Вывод уравнения распространения потенциала действий

Нервный импульс распространяется вдоль аксоны (нервного волокна) с некоторой скоростью без изменения амплитуды. Перемещение потенциала действий связано с перемещением вдоль аксоны локальной (местной) деполяризации с положительным знаком заряда внутри мембраны. По мере продвижения волны деполяризации происходит реполяризация, так что в каждый данный момент небольшой участок нервного волокна оказывается деполяризованным.

Распространение нервного импульса вдоль гладкого немиелинизированного волокна описывается системой Ходжкина-Хаксли [10]:

$$C \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - J(\varphi),$$

где  $C$  – емкость мембраны,  $R$  – сумма внутреннего и внешнего сопротивлений электролитов на единицу длину волокна,  $\varphi$  – плотность электрического тока, протекающего через мембрану,

$$J(\varphi) = h^2 P_k (\varphi - \varphi_k^0) + hm^3 P_{Na} (\varphi - \varphi_{Na}^0) + P(\varphi - \varphi_1) - \text{ионный ток.}$$

Выше указанное уравнение является одномерным нелинейным уравнением диффузии. Здесь

$$\varphi_k = (KT/e) \ln(C_k^0 / C_k^i), \quad \varphi_{Na} = (KT/e) \ln(C_{Na}^0 / C_{Na}^i),$$

$T$  – абсолютная температура,  $e$  – заряд электрона,  $C_{K(Na)}^0, C_{K(Na)}^i$  – внешняя и внутренняя концентрация,  $K$  – коэффициент,  $m, h, n$  – параметры, удовлетворяющие

$$\frac{d(m/h/n)}{dt} = \alpha_{(m/h/n)} * (1 - (m/h/n)) - \beta_{(m/h/n)} * (m/h/n),$$

$\alpha, \beta$  – коэффициенты от мембранного потенциала.

### Постановка параболической задачи

Процесс распространения потенциала действий по нервному волокну описывается параболическим уравнением [11, стр.110; 12, стр.138]:

$$C_m(x, y) u'_t(x, y, t) = \frac{r_a(x, y)}{2\rho_a(x, y)} \Delta u(x, y, t) - \frac{u(x, y, t)}{\rho_m(x, y)l}, \quad (x, t) \in R_+^2, \quad y \in R, \quad (1)$$

где  $C_m(x, y)$  – емкость на единицу площади мембраны,  $r_a(x, y)$  – радиус нервного волокна,  $\rho_m(x, y), \rho_a(x, y)$  – удельное сопротивление плазмы и нервного волокна,  $l$  – толщина мембраны,  $u(x, y, t)$  – внутриклеточный потенциал действий, индексы  $a$  и  $m$  означают индексы аксоны (нервной волокны) и мембраны соответственно,  $\Delta u(x, y, t) = u''_{xx}(x, y, t) + u''_{yy}(x, y, t)$  – оператор Лапласа.

Для определения единственности решения уравнения (1) задаем начальное и граничное условие следующего вида:

$$u(x, y, t)|_{t < 0} \equiv 0, \quad u'_x(x, y, t)|_{x=0} = h(y)\theta(t) + r(y)\theta_1(t) + p(y)\theta_2(t), \quad t \in R_+, \quad (2)$$

где  $h(y)$ ,  $r(y)$ ,  $p(y)$  – заданные функции,  $\theta(t)$  – тета функция Хевисайда,  $\theta_1(t) = t\theta(t)$ ,  $\theta_2(t) = \frac{t^2}{2}\theta(t)$ .

**Постановка гиперболической задачи**

Используя методики С.И.Кабанихина [13] (преобразование Лапласа) из задачи (1)–(2) получим задачу уравнения гиперболического типа [14]:

$$C_m(x, y) \frac{\partial^2 V(x, y, t)}{\partial t^2} = \frac{r_a(x, y)}{2\rho_a(x, y)} \Delta V(x, y, t) - \frac{V(x, y, t)}{\rho_m(x, y)l}, \quad (x, t) \in R_+^2, \quad y \in R, \quad (3)$$

$$V(x, y, t)|_{t < 0} \equiv 0, \quad \left. \frac{\partial V(x, y, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = h(y)\delta(t) + r(y)\theta(t) + p(y)\theta_1(t), \quad y \in R, \quad t \in R_+, \quad (4)$$

где  $\delta(t)$  – дельта функция Дирака,  $h(y)$ ,  $r(y)$ ,  $p(y)$  – заданные функции.

Решение этих задач  $u(x, y, t)$  и  $V(x, y, t)$  связано следующим интегралом

$$u(x, y, t) = \int_0^{\infty} V_t(x, y, \tau) G_t(t, \tau) d\tau = \int_0^{\infty} V(x, y, \tau) G_u(t, \tau) d\tau, \quad (5)$$

где  $G(t, \tau)$  – функция Грина,  $G(t, \tau) = \frac{1}{\sqrt{\pi t}} e^{-\frac{\tau^2}{4t}}$ .

**Целью данной статьи является разработка численного решения задачи (3)-(4), т.е. определение функции  $V(x, y, t)$  при известных значениях коэффициентов  $C_m(x, y)$ ,  $r_a(x, y)$ ,  $l$ ,  $\rho_a(x, y)$ ,  $\rho_m(x, y)$ , а также известных значениях  $h(y)$ ,  $r(y)$ ,  $p(y)$ .**

Пусть относительно коэффициентов уравнения и начальных функций выполнены условия [14]:

$$C_m(x, y), r_a(x, y), \rho_a(x, y), \rho_m(x, y) \in \Lambda_1, \quad h(y), r(y), p(y) \in \Lambda_2, \quad l > 0, \quad (6)$$

где  $\Lambda_1 = \{C_m(x, y) \in C^2((0, d) \times (-D_1, D_1)), \quad 0 < M_1 \leq C_m(x, y) \leq M_2\}$ ,

$$\Lambda_2 = \sup p\{h(y)\} \in (-D, D), \quad h(y) \in C(-D, D), \quad (6')$$

$$D = D_1 + T(M_2 + \alpha), \quad T = \frac{2\alpha}{(M_1 - \alpha)}, \quad M_1, M_2, D - \text{положительные постоянные числа.}$$

**Сведение задачи (3)-(4) к регулярной задаче**

Решаем следующую задачу Эйконала и выпрямляем характеристики уравнения [15]:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_x^2(x, y) + \alpha_y^2(x, y) &= \frac{2\rho_a(x, y)C_m(x, y)}{r_a(x, y)} \\ \alpha(x, y)|_{x=0} &= 0, \quad \alpha(x, y)|_{x=0} = \frac{2\rho_a(0, y) \cdot C_m(0, y)}{r_a(0, y)} \\ \alpha_x(x, y) &> 0, \quad \lim_{x \rightarrow \infty} \alpha(x, y) = \infty \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Введем новые функции  $Cm(\alpha(z, y), y) = C_m(x, y)$ ,  $\rho a(\alpha, y) = \rho_a(x, y)$ ,  $\rho m(\alpha, y) = \rho_m(x, y)$ ,  $ra(\alpha, y) = r_a(x, y)$ ,  $\mathcal{A}(\alpha(x, y), y, t) = V(x, y, t)$ .

Теперь представим решение прямой задачи в виде сингулярной и регулярной частей [15]:

$$\mathcal{G}(\alpha, y, t) = \tilde{\mathcal{G}}(\alpha, y, t) + S(t, y)\theta(t - |\alpha|) + R(t, y)\theta_1(t - |\alpha|) + P(t, y)\theta_2(t - |\alpha|), \quad (8)$$

где  $\tilde{\mathcal{G}}(\alpha, y, t)$  – непрерывная функция.

При этом получим прямую задачу с данными на характеристиках [15]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial t^2} &= \frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial \alpha^2} + L_1 \mathcal{G}(\alpha, y, t), \quad |\alpha| < y < T, \quad y \in (-D, D) \\ \mathcal{G}(\alpha, y, t)|_{|\alpha|=t} &= S(t, y), \quad t \in (0, T), \quad y \in (-D, D) \\ \mathcal{G}(\alpha, y, t)|_{y=-D} &= \mathcal{G}(\alpha, y, t)|_{y=D} = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где 
$$L_1 \mathcal{G}(\alpha, y, t) = \frac{ra(\alpha, y)}{2\rho a(\alpha, y)Cm(\alpha, y)} \left[ \frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial y^2} + \Delta \alpha \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \alpha} + \alpha_y \frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial \alpha \partial y} \right] - \frac{1}{Cm(\alpha, y)\rho a(\alpha, y)} \cdot \mathcal{G}(\alpha, y, t).$$

**Конечно-разностное решение.** Доказательство теоремы о сходимости конечно-разностного решения к точному решению проведем по методике [16]. При решении последней задачи (9) нам потребуются значения  $\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t}, \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \alpha}, \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial y}$  при  $|\alpha|=t$ . Значение

$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial y}$  при  $|\alpha|=t$  находим из (9), а остальные из (6)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{G}(\alpha, y, t)}{\partial y} \Big|_{|\alpha|=t} &= S_y(t, y), \quad t \in (0, T), \quad y \in (-D, D), \\ \frac{\partial \mathcal{G}(\alpha, y, t)}{\partial t} \Big|_{|\alpha|=t-0} &= S_t(t, y) + R(t, y), \quad t \in (0, T), \quad y \in (-D, D), \\ \frac{\partial \mathcal{G}(\alpha, y, t)}{\partial \alpha} \Big|_{|\alpha|=t} &= -\text{sign} \alpha R(t, y), \quad t \in (0, T), \quad y \in (-D, D). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Приближенное решение задачи (9) будем строить конечно-разностным методом и для этого введем равномерную сеточную область, разностные отношения и обозначения. В дальнейшем, для сокращения в обозначениях (9) индексы  $i, j, k$  в решении разностной схемы будем опускать или частично опускать, например

$$V_{\bar{\alpha}}(i, j, k) = V_{\bar{\alpha}}, \quad V_{\bar{t}}(i, j), \quad V_{\bar{y}}(k, j+1) = \frac{V_{ij+1}^k - V_{ij}^k}{h_2}, \quad (11)$$

$$V(k, j-1) = V_{ij-1}^k, \quad V_{\bar{y}}(i, k-1) = \frac{V_{ij}^{k-1} - V_{ij-1}^{k-1}}{h_2}, \quad (12)$$

$$V_{\bar{t}}(i, j) = \frac{V_{ij}^k - V_{ij}^{k-1}}{\tau}, \quad V_{\alpha}(i, j, k+1) = \frac{V_{i+1j}^{k+1} - V_{ij}^{k+1}}{h_1} \quad (13)$$

Отбрасывая малые члены  $O(h^2, h_2^2, \tau^2)$ , (9) приведем к разностной задаче:

$$\left. \begin{aligned} V_{\bar{t}} &= V_{\alpha\bar{\alpha}} + LV_{ij}^k, \quad (ih_1, jh_2, \tau k) \in \Omega_{ij}^k, \\ V_{\pm i, j}^{|2i|} &= S_j^{|2i|}, \quad i = \overline{-N, N}; \quad j = \overline{-L, L}; \\ V_{i, L}^k &= V_{i, -L}^k = 0, \quad i = \overline{-N, N}; \quad k = \overline{|2i|, 2N}; \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где  $LV_{ij}^k = \frac{ra_{ij}}{2 * \rho a_{ij} Cm_{ij}} \left[ V_{y\bar{y}} + (\alpha_{ij})_y V_{\alpha\bar{y}} + \Delta\alpha_{ij} V_{\alpha} \right] + \frac{1}{Cm_{ij} \rho a_{ij}} * V_{ij}^k,$

$Cm_{ij}, (\alpha_{ij})_y, \Delta\alpha_{ij}, ra_{ij}, \rho a_{ij}, S_j^k$  – разностные аналоги функции

$Cm(\alpha, y), \alpha_y, \Delta\alpha, ra(\alpha, y), \rho a(\alpha, y), S(t, y)$  – соответственно, а индекс  $\pm i$  соответствует направлению координат. Введем обозначение и норму

$$\Pi_5 = \max_{i=\overline{-N, N}} \max_{j=\overline{-L, L}} \{ra_{ij}\}, \quad \Pi_8 = \min_{i=\overline{-N, N}} \min_{j=\overline{-L, L}} \left\{ |(\alpha_{ij})_{\bar{y}}|, |\Delta\alpha_{ij}| \right\},$$

$$\Pi_6 = \max_{i=\overline{-N, N}} \max_{j=\overline{-L, L}} \left\{ |(\alpha_{ij})_{\bar{y}}|, |\Delta\alpha_{ij}| \right\}, \quad \Pi_9 = \max_{i=\overline{-N, N}} \max_{j=\overline{-L, L}} \{Cm_{ij}, \rho a_{ij}\},$$

$$\Pi_7 = \min_{i=\overline{-N, N}} \min_{j=\overline{-L, L}} \{Cm_{ij}, \rho a_{ij}\}, \quad \Pi_{10} = \min_{i=\overline{-N, N}} \min_{j=\overline{-L, L}} \{ra_{ij}\}$$

$$\|V\|^2(i, k) = h_1 h_2 \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} (V_{ij}^k)^2.$$

Каждый член сеточного уравнения (14) умножим на  $(V_t + V_{\bar{t}})$  и получим следующий дискретный аналог дифференциального произведения:

$$\begin{aligned} V_{\bar{t}}(V_t + V_{\bar{t}}) &= [V_{\bar{t}}^2(k)]_{\bar{t}}, \\ V_{\alpha\bar{\alpha}}(V_t + V_{\bar{t}}) &= [V_{\alpha}(V_t + V_{\bar{t}})]_{\alpha} - [V_t + V_{\bar{t}}]_{\alpha} V_{\alpha}(i+1) = \\ &= [V_{\alpha}(V_t + V_{\bar{t}})]_{\alpha} - [V_{\alpha}^2]_{\bar{t}} + [(V_{\alpha} V_{i\alpha})(k+1) - (V_{\alpha} V_{i\alpha})(k)], \\ \frac{ra_{ij}}{2 \cdot Cm_{ij} \cdot \rho a_{ij}} V_{y\bar{y}}(V_t + V_{\bar{t}}) &= \left[ \frac{ra_{ij}}{2 \cdot Cm_{ij} \cdot \rho a_{ij}} V_{\bar{y}}(V_t + V_{\bar{t}}) \right]_y - \frac{ra_{ij}}{2Cm_{ij} \rho a_{ij}} [V_y^2]_{\bar{t}} + \\ &+ \frac{ra_{ij}}{2Cm_{ij} \rho a_{ij}} [(V_y V_{iy})(k+1) - (V_y V_{iy})(k)] - \left[ \left( \frac{ra_{ij}}{2Cm_{ij} \rho a_{ij}} \right)_{\bar{y}} (V_t + V_{\bar{t}}) \right]_{\bar{y}} (j+1) V_y, \\ \frac{ra_{ij}}{2Cm_{ij} \rho a_{ij}} (\alpha_{ij})_y V_{\alpha\bar{y}}(V_t + V_{\bar{t}}) &= \left[ \frac{ra_{ij}}{2Cm_{ij} \rho a_{ij}} (\alpha_{ij})_y V_{\alpha}(V_t + V_{\bar{t}}) \right]_y - \\ &- \left\{ \left[ \frac{ra_{ij}}{2Cm_{ij} \rho a_{ij}} (\alpha_{ij})_y (V_t + V_{\bar{t}}) \right]_y V_{\alpha} \right\} (j-1) = \left[ \frac{ra_{ij}}{2Cm_{ij} \rho a_{ij}} (\alpha_{ij})_y V_{\alpha}(V_t + V_{\bar{t}}) \right]_{\bar{y}} - \\ &- \left\{ \frac{ra_{ij}}{2Cm_{ij} \rho a_{ij}} (\alpha_{ij})_y (V_t + V_{\bar{t}}) V_{\alpha} + \left[ \left( \frac{ra_{ij}}{2Cm_{ij} \rho a_{ij}} (\alpha_{ij})_y \right)_{\bar{y}} (V_t + V_{\bar{t}}) \right]_{\bar{y}} (j+1) V_{\alpha} \right\} (j-1) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \left[ \frac{ra_{ij}}{2Cm_{ij}\rho a_{ij}} (\alpha_{ij})_y V_\alpha (V_t + V_i) \right]_{\bar{y}} - \\
 &- \left\{ \frac{ra_{ij}}{2Cm_{ij}\rho a_{ij}} (\alpha_{ij})_y V_\alpha [V_y(k+1) - V_y(k)] / \tau + \left[ \left( \frac{ra_{ij}}{2Cm_{ij}\rho a_{ij}} (\alpha_{ij})_y (V_t + V_i) \right) (j+1) V_\alpha \right] \cdot (j-1) \right\} \\
 &\Delta \alpha_{ij} V_\alpha [V_t + V_i] = \Delta \alpha_{ij} V_\alpha [V_t + V_i], \\
 &\frac{1}{Cm_{ij}\rho a_{ij}} V_{ij}^k (V_t + V_i) = \frac{1}{Cm_{ij}\rho a_{ij}} V_{ij}^k (V_t + V_i).
 \end{aligned}$$

Умножая все выше полученные на  $\mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2$ , суммируя по индексам

$$j = \overline{-L+1, L-1}; \quad i = \overline{-N+2, N-2}; \quad k = \overline{|2i|+3, 2N-1}, \text{ и используя введенные}$$

обозначения имеем

$$\mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2 \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \sum_{k=|2i|+3}^{2N-1} [V_{ii}(V_t + V_i)] = \|V_i\|^2(i, 2N) - \|V_i\|^2(i, |2i|+3),$$

$$\mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2 \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \sum_{k=|2i|+3}^{2N-1} [V_\alpha^2]_t = \|V_\alpha\|^2(i, 2N) - \|V_\alpha\|^2(i, |2i|+3),$$

$$\mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2 \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \sum_{k=|2i|+3}^{2N-1} [V_y^2]_t = \|V_y\|^2(i, 2N) - \|V_y\|^2(i, |2i|+3),$$

$$\mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2 \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \sum_{k=|2i|+3}^{2N-1} \{ [V_\alpha(V_t + V_i)](i+1, k) - [V_\alpha(V_t + V_i)](i, k) \} / h_1 =$$

$$= \frac{\tau}{h_1} [ \langle \sum_{i=0}^{-N+2} - \|V_\alpha(V_t + V_i)\|(i, |2i|+3) - \rangle \sum_{i=0}^{-N+3} \|V_\alpha(V_t + V_i)\|(i, |2i|+4) + \rangle \sum_{i=-N+2}^{-1} \|V_\alpha(V_t + V_i)\|(i, |2i|+1) +$$

$$+ \rangle \sum_{i=1}^{N-2} \|V_\alpha[V_t + V_i]\|(i, |2i|+2) ] \leq \|\Gamma\|_1^2(i, |2i|+3).$$

Здесь символ  $\rangle \sum_{i=\mathcal{G}_1}^{\mathcal{G}_2}$  означает, что суммирование проводится по  $i$  от  $\mathcal{G}_1$  до  $\mathcal{G}_2$  на

характеристиках и

$$\begin{aligned}
 \|\Gamma\|_1^2(i, |2i|+3) &= \frac{\tau}{h_1} \{ \sum_{i=0}^{-N+2} (\|V_\alpha\|^2 + \|V_i\|^2)(i, |2i|+2) + \rangle \sum_{i=0}^{-N+3} (\|V_\alpha\|^2 + \|V_i\|^2)(i, |2i|+4) + \\
 &+ \rangle \sum_{i=-N+2}^{-1} (\|V_\alpha\|^2 + \|V_i\|^2)(i, |2i|+1) + \rangle \sum_{i=1}^{N-2} (\|V_\alpha\|^2 + \|V_i\|^2)(i, |2i|+3) \}.
 \end{aligned}$$

Выводим остальные выражения. В связи с тем, что решение задачи (9) равно нулю на границах  $y = \pm D$  имеем

$$\mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2 \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \sum_{k=|2i|+3}^{2N-1} \left[ \left( \frac{ra}{Cm * \rho a} \right)_{ij} V_{\bar{y}} (V_t + V_i) \right]_y =$$



$$= \frac{\mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2}{h_2} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \sum_{k=|2i|+3}^{2N-1} \left\{ \left[ \left( \frac{ra}{Cm * \rho\alpha} \right) V_{\bar{y}}(V_t + V_i) \right]_{ij}(i, L, k) - \left[ \left( \frac{ra}{Cm * \rho\alpha} \right) V_{\bar{y}}(V_t + V_i) \right]_{ij}(i, -L, k) \right\} = 0,$$

$$\mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2 \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \sum_{k=|2i|+3}^{2N-1} \left[ \left( \frac{b}{c} \right)_{ij} \alpha_j V_\alpha(V_t + V_i) \right]_{\bar{y}} = 0.$$

Выводим следующие выкладки

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2 \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \sum_{k=|2i|+3}^{2N-1} [(V_\alpha V_{i\alpha})(i, k+1) - (V_\alpha V_{i\alpha})(i, k)] &= \\ = \mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2 \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} [(V_\alpha V_{i\alpha})(i, 2N) - (V_\alpha V_{i\alpha})(i, |2i|+3)] &= \\ = \frac{\mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2}{h_1} \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \{ V_\alpha(i, 2N)[V_i(i+1, 2N) - V_i(i, 2N)] - V_\alpha(i, |2i|+3)[V_i(i+1, |2i|+3) - V_i(i, |2i|+3)] \} \end{aligned}$$

Из последнего выражения имеем следующие оценки:

$$\begin{aligned} \frac{\mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2}{h_2} \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \{ V_\alpha(i, 2N)[V_i(i+1, 2N) - V_i(i, 2N)] \} &\leq \\ = \frac{\mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2}{h_1} \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \{ V_\alpha(i, 2N)[|V_i(i+1, 2N) - V_i(i, 2N)|] \} &\leq \\ \leq \frac{\mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2}{h_1} \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} [ |V_\alpha|^2(i, 2N) + |V_i|^2(i, 2N) ] &\leq \frac{\tau}{h_1} [ \|V_\alpha\|^2 + \|V_i\|^2 ](i, 2N). \end{aligned}$$

Теперь оцениваем

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2 \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \sum_{k=|2i|+3}^{2N-1} \left( \frac{ra}{2Cm\rho\alpha} \right)_{ij} [(V_y V_{iy})(i, k+1) - (V_y V_{iy})(i, k)] &= \\ = \mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2 \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \left( \frac{ra}{2Cm\rho\alpha} \right)_{ij} [(V_y V_{iy})(i, 2N) - (V_y V_{iy})(i, |2i|+3)] &= \\ = \frac{\mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2}{h_2} \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \left\{ \left( \frac{ra}{2Cm\rho\alpha} \right)_{ij} [V_y(i, 2N)(V_i(i, j+1, 2N) - V_i(i, j, 2N)) - \right. & \\ \left. V_y(i, |2i|+3)(V_i(i, j+1, |2i|+3) - V_i(i, j, |2i|+3))] \right\} &\leq \\ \leq \frac{\tau}{h_2^2} \frac{\Pi_5}{\Pi_7^2} \{ \|V_y\|^2 + \|V_i\|^2 \} [i, 2N) + \{ \|V_y\|^2 + \|V_i\|^2 \} [i, |2i|+3) & \\ \mathcal{H}_1 \mathcal{H}_2 \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \sum_{k=|2i|+3}^{2N-1} \left( \frac{ra}{2Cm\rho\alpha} \right)_{ij} \alpha_j [V_\alpha(V_y(k+1) - V_y(k-1))] &= \\ = h_1 \mathcal{H}_2 \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \left( \frac{ra}{2Cm\rho\alpha} \right)_{ij} \alpha_j [V_\alpha(i, 2N-1)V_y(i, 2N) - V_\alpha(i, |2i|+3)V_y(i, |2i|+3)] \end{aligned}$$

Каждое выражение оценим отдельно

$$h_1 \mathcal{H}_2 \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \left( \frac{ra}{2Cm\rho\alpha} \right)_{ij} \alpha_j V_\alpha(i, 2N-1)V_y(i, 2N) \geq \frac{\Pi_{10}}{2\Pi_9^2} \Pi_8 [ \|V_\alpha\|(i, 2N-1) \cdot \|V_y\|(i, 2N) ] =$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\Pi_{10}}{2\Pi_9^2} \Pi_8 \left\{ \|V_\alpha\| \|V_y\| (i, 2N) - \|V_y\| (i, 2N) \left[ \|V_\alpha\| (i, 2N) - \|V_\alpha\| (i, 2N - 1) \right] \right\} \geq \\
 &\geq \frac{\Pi_{10}}{2\Pi_9^2} \Pi_8 \left\{ \|V_\alpha\| \|V_y\| (i, 2N) - \|V_y\| (i, 2N) \frac{\tau}{h_1} \|V_i\| (i, 2N) \right\} \geq \\
 &\geq -\frac{1}{4} \frac{\Pi_{10}}{\Pi_9^2} \Pi_8 \left\{ \|V_\alpha\|^2 + \|V_y\|^2 + \frac{\tau}{h_1} \|V_y\|^2 + \frac{\tau}{h_1} \|V_i\|^2 \right\} (i, 2N), \\
 &h_1 h_2 \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} [V_\alpha(i, |2i|+3) \cdot V_y(i, |2i|+3)] \leq \\
 &\leq \frac{1}{4} \frac{\Pi_5}{\Pi_7^2} \Pi_6 \left\{ \|V_\alpha\|^2 + \|V_y\|^2 + \frac{\tau}{h_1} \|V_y\|^2 + \frac{\tau}{h_1} \|V_i\|^2 \right\} (i, |2i|+3).
 \end{aligned}$$

Дальше проводим оценки

$$\begin{aligned}
 &\mathcal{A}_1 h_2 \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \sum_{k=|2i|+3}^{2N-1} \left[ \left( \frac{ra}{2Cm\rho\alpha} \right)_{ij} (V_t + V_i) \right] (j+1) V_y \leq \tau \frac{\Pi_5}{2\Pi_7^2} \sum_{k=|2i|+3}^{2N} \left[ \|V_i\|^2 + \|V_y\|^2 \right] (i, k), \\
 &\mathcal{A}_1 h_2 \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \sum_{k=|2i|+3}^{2N-1} \left[ \left( \frac{ra}{2Cm\rho\alpha} \right)_{ij} \alpha_j \right] \cdot (V_t + V_i) (j+1) V_\alpha \right] (j-1) \leq \\
 &\leq 3\tau \frac{\Pi_5}{2\Pi_7^2} \Pi_6 \sum_{k=|2i|+3}^{2N} \left[ \|V_i\|^2 + \|V_\alpha\|^2 \right] (i, k), \\
 &\mathcal{A}_1 h_2 \sum_{j=-L+1}^{L-1} \sum_{i=-N+2}^{N-2} \sum_{k=|2i|+3}^{2N-1} \left[ \left( \frac{ra}{2Cm\rho\alpha} \right)_{ij} \right] \cdot \Delta\alpha V_\alpha (V_t + V_i) \right] \leq \tau \frac{\Pi_5 \Pi_6}{2\Pi_7^2} \sum_{k=|2i|+3}^{2N} \left[ \|V_i\|^2 + \|V_\alpha\|^2 \right] (i, k).
 \end{aligned}$$

Оценим последнее выражение

$$\frac{1}{Cm_{ij} \rho_{ij}} V_{ij}^k * (V_t + V_i) \leq \tau \frac{1}{2\Pi_7^2} \sum_{k=|2i|+3}^{2N} \left[ \|V_i\|^2 + \|V_\alpha\|^2 \right] (i, k).$$

В силу выше полученных оценок, из уравнения (9) следует

$$\begin{aligned}
 &\left( \|V_i\|^2 + \|V_\alpha\|^2 + \frac{\Pi_7}{\Pi_9} \|V_y\|^2 \right) (i, 2N) \leq \left( \|V_i\|^2 + \|V_\alpha\|^2 + \frac{\Pi_5}{\Pi_{10}} \|V_y\|^2 \right) (i, |2i|+3) + \\
 &+ \|\Gamma\|^2 (i, |2i|+3) + \frac{\tau}{h_1} \left[ \|V_\alpha\|^2 + \|V_i\|^2 \right] (i, 2N) + \frac{\tau}{h_1} \left[ \|V_\alpha\|^2 + \|V_i\|^2 \right] (i, |2i|+3) + \\
 &+ \frac{\mathcal{A}\Pi_5}{h_2 \Pi_{10}} \left[ \|V_y\|^2 + \|V_i\|^2 \right] (i, 2N) + \frac{\mathcal{A}\Pi_5}{h_2 \Pi_{10}} \left[ \|V_y\|^2 + \|V_i\|^2 \right] (i, |2i|+3) + \\
 &+ \frac{\Pi_7}{\Pi_9} \Pi_8 \left[ \|V_\alpha\|^2 + \frac{\tau}{h_1} \|V_i\|^2 + \left( 1 + \frac{\tau}{h} \right) \|V_y\|^2 \right] (i, 2N) + \\
 &+ \frac{\Pi_5}{\Pi_{10}} \Pi_6 \left[ \|V_\alpha\|^2 + \frac{\tau}{h_1} \|V_i\|^2 + \left( 1 + \frac{\tau}{h_1} \right) \|V_y\|^2 \right] (i, |2i|+3) + \\
 &+ \tau \frac{\Pi_5}{\Pi_{10}} \sum_{k=|2i|+3}^{2N} \left[ \|V_i\|^2 + \|V_y\|^2 \right] (i, k) + 3\tau \frac{\Pi_5}{\Pi_{10}} \Pi_6 \sum_{k=|2i|+3}^{2N} \left[ \|V_i\|^2 + \|V_\alpha\|^2 \right] (i, k) + \\
 &+ \tau \frac{\Pi_5}{\Pi_{10}} \sum_{k=|2i|+3}^{2N} \left[ \|V_i\|^2 + \|V_\alpha\|^2 \right] (i, k) + \tau \frac{1}{2\Pi_7^2} \sum \left[ \|V_i\|^2 + \|V_\alpha\|^2 \right] (i, k).
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[ 1 - \frac{\tau}{h_1} - \frac{\tau}{h_2} \frac{\Pi_5}{2\Pi_7^2} - \frac{\tau}{h_1} \frac{\Pi_{10}}{4\Pi_9^2} \Pi_8 + \frac{\tau}{2\Pi_9^2} \right] \|V_i\|^2(i, 2N) + \left[ 1 - \frac{\tau}{h_1} - \frac{\Pi_{10}}{4\Pi_9^2} \Pi_8 \right] \|V_\alpha\|^2(i, 2N) + \\
 & + \left[ \frac{\Pi_{10}}{4\Pi_9^2} - \frac{\tau}{h_2} * \frac{\Pi_{10}}{4\Pi_9^2} - \frac{\Pi_{10}}{2\Pi_9^2} * \Pi_8 - \frac{\tau}{h_1} * \frac{\Pi_{10}}{2\Pi_9^2} * \Pi_8 \right] \|V_y\|^2(i, 2N) \leq \\
 & \leq \|V\|_1^2(i, |2i| + 3) + \left[ 1 + \frac{\tau}{h_1} + \frac{\tau}{h_2} * \frac{\Pi_5}{2\Pi_7^2} + \frac{\tau}{h_1} * \frac{\Pi_5}{4\Pi_7^2} * \Pi_6 \right] \|V_i\|^2(i, |2i| + 3) + \\
 & + \left[ 1 + \frac{\tau}{h_1} + \frac{\Pi_5}{4\Pi_7^2} \Pi_6 \right] \|V_\alpha\|^2(i, |2i| + 3) + \left[ \frac{\Pi_5}{4\Pi_7^2} - \frac{\tau}{h_2} \frac{\Pi_5}{4\Pi_7^2} + \frac{\Pi_5}{2\Pi_7^2} \Pi_6 - \frac{\tau}{h_1} \frac{\Pi_5}{2\Pi_7^2} \Pi_6 \right] * \\
 & * \|V_y\|^2(i, |2i| + 3) + \left[ \tau \frac{\Pi_5}{\Pi_7^2} + 3\tau \frac{\Pi_5}{\Pi_7^2} + \tau \frac{\Pi_5 \Pi_6}{\Pi_7^2} + \tau \frac{1}{\Pi_7^2} \right] * \sum_{k=|2i|+3}^{2N} \|V\|_1^2(i, k). \tag{15}
 \end{aligned}$$

где  $\|V\|_1^2(i, k) = (\|V_i\|^2 + \|V_\alpha\|^2 + \|V_y\|^2)(i, k)$ .

Из (15) получим

$$\|V\|_1^2(i, 2N) \leq \frac{1}{P_2} \|V\|_1^2(i, |2i| + 3) + \frac{P_3}{P_2} \|V\|_1^2(i, |2i| + 3) + \frac{\tau P_4}{P_2} \sum_{k=|2i|+3}^{2N-1} \|V\|_1^2(i, k), \tag{16}$$

здесь 
$$P_2 = \min \left\{ \left[ 1 - \frac{\tau}{h_1} - \frac{\tau}{h_2} \frac{\Pi_5}{2\Pi_7^2} - \frac{\tau}{h_1} \frac{\Pi_{10}}{4\Pi_9^2} \Pi_8 + \frac{\tau}{2\Pi_9^2} \right], \left[ 1 - \frac{\tau}{h_1} - \frac{\Pi_{10}}{4\Pi_9^2} \Pi_8 \right], \left[ \frac{\Pi_{10}}{4\Pi_9^2} - \frac{\tau}{h_2} \frac{\Pi_{10}}{4\Pi_9^2} - \frac{\Pi_{10}}{2\Pi_9^2} \Pi_8 - \frac{\tau}{h_1} \frac{\Pi_{10}}{2\Pi_9^2} \Pi_8 \right] \right\},$$

$$P_3 = \max \left\{ \left[ 1 + \frac{\tau}{h_1} + \frac{\tau}{h_2} * \frac{\Pi_5}{2\Pi_7^2} + \frac{\tau}{h_1} * \frac{\Pi_5}{4\Pi_7^2} * \Pi_6 \right], \left[ 1 + \frac{\tau}{h_1} + \frac{\Pi_5}{4\Pi_7^2} * \Pi_6 \right], \left[ \frac{\Pi_5}{\Pi_7} + \frac{\tau}{h_2} * \frac{\Pi_5}{\Pi_7} + \frac{\Pi_5}{\Pi_7} * \Pi_6 + \frac{\tau}{h_1} * \frac{\Pi_5}{\Pi_7} * \Pi_6 \right] \right\},$$

$$P_4 = \left[ \tau \frac{\Pi_5}{\Pi_7^2} + 3\tau \frac{\Pi_5}{\Pi_7^2} + \tau \frac{\Pi_5 \Pi_6}{\Pi_7^2} + \tau \frac{1}{\Pi_7^2} \right].$$

В силу равенства  $V(i, 2N) = V(i, |2i| + 3) + \tau \sum_{k=|2i|+4}^{2N} V_i(i, k)$  получим неравенства

$$\begin{aligned}
 \|V\|^2(i, 2N) & \leq \|V\|^2(i, |2i| + 3) + 2\|V\|(i, |2i| + 3) \tau \sum_{k=|2i|+4}^{2N} \|V_i\|(i, k) + \left[ \tau \sum_{k=|2i|+4}^{2N} \|V_i\|(i, k) \right]^2 \leq \\
 & \leq 2\|V\|^2(i, |2i| + 3) + 4N\tau^2 \sum_{k=|2i|+4}^{2N} \|V_i\|^2(i, k).
 \end{aligned}$$

Таким образом, усиливая оценки, из последнего неравенства получим

$$\begin{aligned}
 \|V\|^2(i, 2N) & \leq \|V\|^2(i, |2i| + 3) + 2\|V\|(i, |2i| + 3) \tau \sum_{k=|2i|+4}^{2N} \|V_i\|(i, k) + \\
 & + \left[ \tau \sum_{k=|2i|+4}^{2N} \|V_i\|(i, k) \right]^2 \leq 2\|V\|^2(i, |2i| + 3) + 4N\tau^2 \sum_{k=|2i|+4}^{2N} \|V_i\|^2(i, k).
 \end{aligned}$$

Таким образом, усиливая оценки, из последнего неравенства получим

$$\|V\|^2(i, 2N) \leq 2\|V\|^2(i, |2i| + 3) + 4N\tau^2 \sum_{k=|2i|+4}^{2N} \|V_i\|^2(i, k). \quad (17)$$

Из неравенства (16) и (17) имеем

$$\begin{aligned} \|V\|_2^2(i, 2N) &\leq \frac{1}{P_2} \|\Gamma\|_1^2(i, |2i| + 3) + \frac{P_3}{P_2} \|V\|_1^2(i, |2i| + 3) + \\ &+ 2\|V_t\|^2(i, |2i| + 3) + \left[ \frac{\tau P_4}{P_2} + 4N\tau^2 \right] \sum_{k=|2i|+3}^{2N} \|V_i\|_2^2(i, k), \end{aligned} \quad (18)$$

где  $\|V\|_2^2(i, k) = \|V\|_1^2(i, k) + \|V\|^2(i, k)$ .

Используя дискретный аналог неравенства Гронуолла-Беллмана, из (18) имеем

$$\|V\|_2^2(i, 2N) \leq P_5 \left[ \|\Gamma\|_2^2(i, |2i| + 3) + \|V\|_2^2(i, |2i| + 3) \right] \exp \left[ \left( \frac{\tau P_4}{P_2} + 4N\tau^2 \right) t \right] \quad (19)$$

$$P_5 = \max \left\{ 2, \frac{P_3}{P_2}, \frac{1}{P_2} \right\}.$$

Если считать, что  $\mathcal{G}_{ij}^k$  – точное сеточное решение задачи (14), то есть с малыми членами  $O(h_1^2 + h_2^2 + \tau^2)$ , то и для сеточной функции  $\mathcal{G}_{ij}^k$  также можно получить оценку (19), но с малым членом  $O(h_1^2 + h_2^2 + \tau^2)$ . Следовательно

$$\|\mathcal{G} - V\|(i, 2N) \leq P_6 (5\tau^2 + h_2^2), \quad h_1 = 2\tau. \quad (20)$$

где  $P_6 = \exp \left\{ P_4 \frac{T^2}{P_2} + 2T^3 \right\} \|\mathcal{G}\| C^4(\Omega(T, D)) / 12$

Таким образом, доказана теорема

**Теорема.** Пусть выполнены условия (6)–(7) и решение задачи (9) существует и имеет непрерывные частные производные до четвертого порядка включительно в области  $\Omega(T, D)$ . Тогда существует  $C_2 > 0$  такое, что при  $\tau/h_2 < C_2$  решение конечно-разностной задачи (14) сходится к точному решению (9) со скоростью порядка  $O(h_1^2 + h_2^2 + \tau^2)$  в классе  $W_2^1(\Omega(T, D))$  и справедлива оценка (20). Коэффициент  $C_2$  зависит только от нормы коэффициентов уравнения.

Из эквивалентности задач (9) и (3)–(4), а также (1)–(2) следует приближенное конечно-разностное решение задачи (14) также сходится к точному решению задач (3)–(4) и (1)–(2) со скоростью порядка  $O(h_1^2 + h_2^2 + \tau^2)$  в классе  $W_2^1(\Omega(T, D))$ , где  $h$  – шаг по  $z$ , при выполнении условий теоремы.

**Заключение.** Построено приближенное конечно-разностное решение двумерной прямой задачи распространения потенциала действий по нервному волокну с мгновенным и шнуровым источником.

**Вывод.** Доказана сходимость приближенного конечно-разностного решения к точному решению поставленной задачи.

***Литература***

1. Hodgkin A.L., Rushton W.A. The electrical constants of a crustacean nerve fibre // Proc.Roy.Soc.London. 1946. Ser B.V.133.P.444–479.
2. Hodgkin A.L., Huxley A.F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve // J.Physiol. (London). 1952. V.117. N4. P 500–544.
3. Максименко Е.В. Аналитическая модель нервного импульса // Обзорение прикладной и промышленной математики. 2003. Т.10. Вып 3. С. 696–697.
4. Максименко Е.В. Использование уравнения Кортевега-де Фриза для моделирования трансмембранного потенциала в нервном волокне // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета, серия «Естественно-научная», 2004. №1(7). С. 234–235.
5. Максименко Е.В. Моделирование распространения нервного импульса с использованием ЭВМ // Обзорение прикладной и промышленной математики. 2004. Т.11. Вып. 2. С. 368–369.
6. Максименко Е.В. Об использовании математических методов в биологических исследованиях // Обзорение прикладной и промышленной математики. 2005. Т.12. Вып.2. С. 431–432.
7. Селезов И.Т., Морозова Л.В. Обобщение задачи возбуждения и распространения потенциала действия по нервному волокну // Прикладная гидромеханика. 2010. Т.12. №3. С. 75–83.
8. Богатов Н.М., Морозова Л.В., Понетаева Е.Г. Моделирование распространения электрического импульса в нервном волокне // Коллективная монография. Современные проблемы физики, биофизики и инфокоммуникационных технологий. Краснодар: Краснодарский ЦНТИ, 2012. – С. 33–44.
9. Потентаева Е.Г., Григорян Л.Р., Богатов Н.М. Расчет изменения потенциала действия в нервном волокне. Сентябрь 7, 2016. admin. Системы и приборы медицинского назначения.
10. Ходжкин А.Л. Нервный импульс, перевод с англ., М.1965
11. Понамаренко Г.Н., Тарковский И.И. Биофизические основы физиотерапии. Учебное пособие. М.: ОАО, Изд-во «Медицина» 2006. 176 с.
12. Новиков Д.А., Филимонов М.М. Биофизика. Курс лекций. В двух частях. Часть 1. Минск, БГУ, 2008. 184 с.
13. Кабанихин С.И. Обратные и некорректные задачи. Новосибирск. Сибирское научное издательство, 2009. 457 с.
14. Сатыбаев А.Дж. Конечно-разностное регуляризованное решение обратных задач гиперболического типа. Ош: Ош обл. типография. 2001. 143 с.
15. Романов В.Г. Устойчивость в обратных задачах. М.: Научный мир. 2004. 304 с.
16. Сатыбаев А.Дж., Жанибеков М., Анищенко Ю.В., Маматкасымова А.Т. Численный алгоритм решения двумерной прямой задачи геоэлектрики с плоской границей и шнуровым источником. Известия КГТУ имени И. Раззакова, №3(33), часть 1, Бишкек 2016, С. 180–189.

*А.Б. Бакасова, Т.К. Сатаркулов, Г.Н. Ниязова*  
*Институт машиноведения и автоматизации НАН КР*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОГЭС НОВОГО ТИПА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Приведено описание трех запатентованных вариантов микроГЭС, отличающихся конструктивным исполнением маховика с автоматически регулируемой массой и моментом инерции (АРМИ). Рассмотрены результаты компьютерного моделирования (КМ) микроГЭС при заданных параметрах математической модели. Даны рекомендации по определению параметров микроГЭС на основании полученных результатов КМ, проведенного с помощью пакетов программ MatLab/Simulink.

Ключевые слова: микроГЭС, маховик, моделирование, гидротурбина, стабилизация частоты вращения, регулятор Уатта, MatLab/Simulink.

**Введение и постановка задачи.** Проблему электроснабжения мобильных локальных маломощных потребителей, находящихся в труднодоступных районах, отрезанных от центрального электроснабжения, можно решить, используя гидроресурсы малых рек.

В таких случаях для производства электроэнергии возможно использование микроГЭС малой мощности, так как она обладает рядом преимуществ: надёжность, экологичность, компактностью и быстрой окупаемостью [1–4].

В работах [5–8] нами предложены конструкции и приведено описание принципов работы различных вариантов микроГЭС нового типа, в которых стабилизация частоты основана на использовании полого маховика [8] с АРМИ и потоком воды, который подается на вход гидротурбины. При заполнении или удалении воды из полости маховика изменяются масса маховика и его момент инерции (рис. 1 а, б).

На рис. 1 а): 1 – напорный трубопровод, выполняющий функцию вала гидротурбины (ГТ) 13; 2 – ротор генератора, жестко прикрепленный к валу ГТ, 3 – статор генератора; 4 – маховик со следующими элементами (5, 6 – клапаны, 7 – спица, 8 – рычаг, шарнирно связанный с корпусом маховика, 9 – металлический шар жестко закрепленный к рычагу); 10 – подшипник; 11 – поток воды, выходящий из ГТ; 12 – поток воды, поступающий в ГТ.

На рис. 1 б): 1 – напорный трубопровод, одновременно выполняющий функцию вала ГТ 14; 2 – ротор генератора, жестко прикрепленный к валу ГТ; 3 – статор генератора; 4 – полый маховик для заполнения жидкостью, разделенный на две части перегородкой и жестко прикрепленный к валу ГТ. Маховик состоит из следующих элементов: 5, 6 – внешние и внутренние клапаны; 7 – спицы, к которым с одного конца жестко прикреплены цилиндрические трубки (закрытые сверху) 10, а с другой стороны клапаны 5 и 6, 9 – стержни, жестко закрепленные к валу 1, на которые насажены

грузики 8 с массой  $m$ , притянутые пружинами 11; 12 – поток воды, поступающий в напорный трубопровод ГТ; 13 – поток воды, выходящий из ГТ.

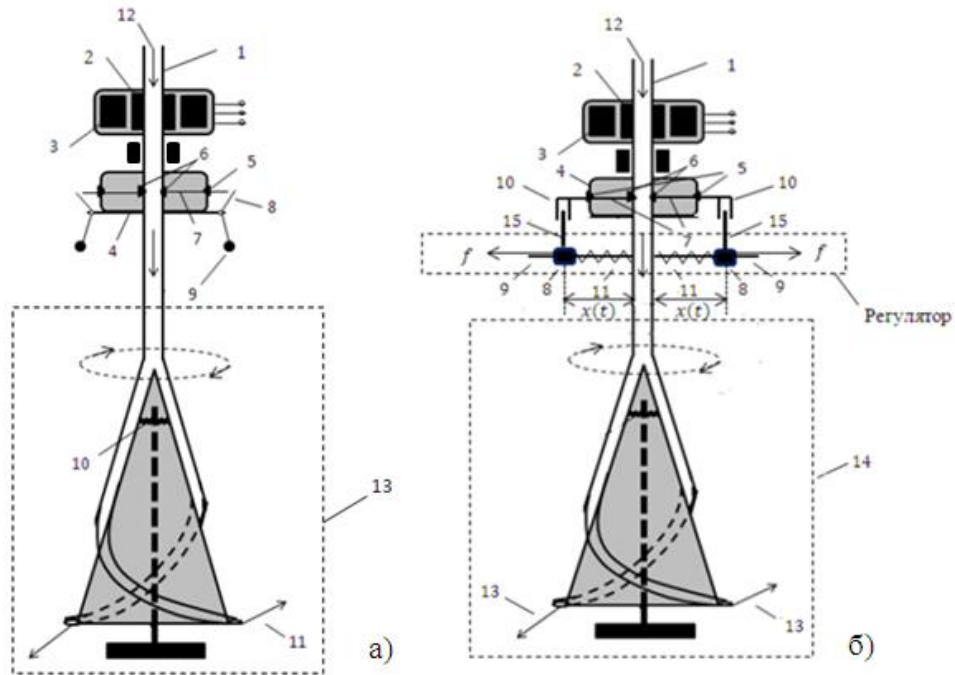


Рисунок 1 – Упрощённые схемы микроГЭС [5, 6]

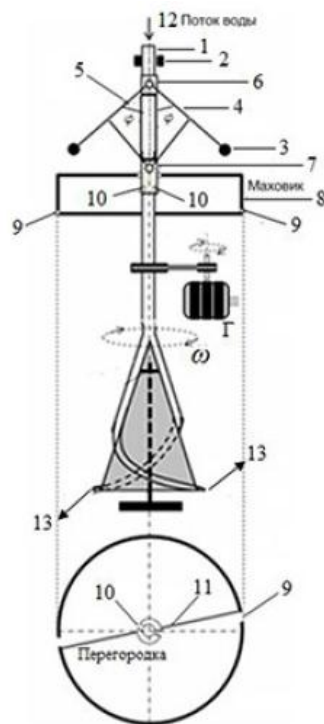


Рисунок 2 – Упрощённая схема микроГЭС [7]

На рис. 2: напорный трубопровод 1, который одновременно используется в качестве вертикального вала гидротурбины и вала центробежного регулятора; полый маховик 8 с моментом инерции  $J_M$ , 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 скорости вращения  $\omega$  гидротурбины отверстия 10 закрыты муфтой 7, а полость маховика не заполнена водой. Гидротурбина приводится во вращательное движение силой реактивной отдачи напора воды 13 и способна совершать полезную работу, вращая с помощью ременной передачи ротор генератора Г.

Конструкция центробежного регулятора (ЦР) такая же, как у паровой машины Уатта. 4, 5 – два одинаковых стержня, шарнирно прикрепленных к напорному трубопроводу 1, с одинаковыми грузами  $m$  на концах; 6 – неподвижная втулка; 7 – подвижная муфта, надетая на напорный трубопровод 1.

Важными элементами в конструкциях АРМИ маховиков (рис. 1 а, б) являются пружины, от которых зависит работа клапанов, управляющих поступлением потока воды в полости маховика.

Испытания действующих макетов микроГЭС (рис. 3) выявили следующие недостатки в конструкциях (рис. 1 а, б): несинхронизированные действия пружин, а следовательно и клапанов; снижение качества стабилизации частоты из-за старения материала пружины.

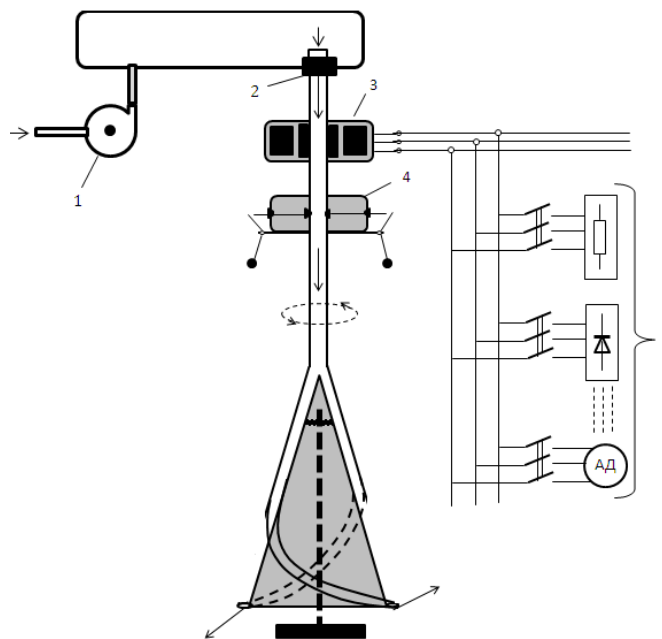


Рисунок 3 – Схема лабораторной установки для физического моделирования микроГЭС: 1 – насосная установка; 2 – подшипник скольжения с уплотнением; 3 – генератор; 4 – АРМИ маховик; 5 – нагрузки [5]

В то же время конструкция микроГЭС, представленная на рис. 2, указанными недостатками не обладает.

В данной работе поставлена задача – выработать рекомендации по определению параметров микроГЭС (рис. 2) на основании результатов компьютерного моделирования.



**Общие сведения о математической модели микроГЭС**

Математическая модель устройства (рис. 2), разработанная в [7] имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\phi}{d\tau} &= \psi; \\ \frac{d\psi}{d\tau} &= \omega^2 \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi - \frac{g}{l} \cdot \sin \phi - \frac{b}{m \cdot l} \cdot \psi; \\ \frac{d\omega}{d\tau} &= \frac{k_1}{J(\phi)} \cdot \cos \phi - \frac{F}{J(\phi)} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $\phi$  – угол отклонения от вертикали стержней 4, 5 ЦР;  $\tau$  – время;  $\psi$  – скорость изменения  $\phi$  (определена первым уравнением);  $\omega$  – угловая скорость вращения маховика (ведущего вала) и ЦР;  $g$  – ускорение свободного падения;  $b$  – постоянная трения;  $l$  – длина стержней 4, 5;  $m$  – масса каждого из грузов, закрепленных на плечах ЦР (рис. 2).

Введением дополнительных переменных [7]

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

сокращено число независимых переменных. В результате (1) примет вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2; \\ \frac{dx_2}{dt} &= (\sin x_1 \cdot \cos x_1) \cdot x_3^2 - \sin x_1 - \gamma \cdot x_2; \\ \frac{dx_3}{dt} &= \frac{1}{J(x_1)} \cdot H \cdot (\cos x_1 - \rho), \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где

$$J(x_1) = J_1 - k_2 \cdot (\cos x_1 - M \cdot \cos \tilde{\phi}); \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{b}{m(gl)^{1/2}}; \quad H = \frac{k_1 \cdot l}{g}; \quad \rho = \frac{F}{k_1}; \quad (5)$$

$$F = P_r - P_{\text{мех}}(\tilde{\phi}) + k_1 \cos \tilde{\phi}. \quad (6)$$

В формуле (6)  $P_r$  – момент силы, вызванный электрической нагрузкой генератора,  $P_{\text{мех}}(\tilde{\phi})$  – момент силы, создаваемый реактивной отдачей напора воды 13 (рис. 2) при некотором значении угла  $\tilde{\phi}$ , вблизи которого меняется угол  $\phi$ .

Система уравнений (3) относится к нелинейным «жестким» дифференциальным уравнениям и описывает динамику поведения микроГЭС. Компьютерное

моделирование режима его работы реализовано в среде Simulink [9], в соответствии со структурными схемами, представленными на (рис. 4): 1 – ЦП; 2 – система «гидротурбина-генератор»; 3 – вычисление значения некоторого угла  $\tilde{\varphi}$  в градусах, вблизи которого меняется  $\varphi$  (по формуле 4, уравнение 1 [9]); 4 – вычисление критического значения параметра  $\gamma_c$  (по формуле 12 [9]).

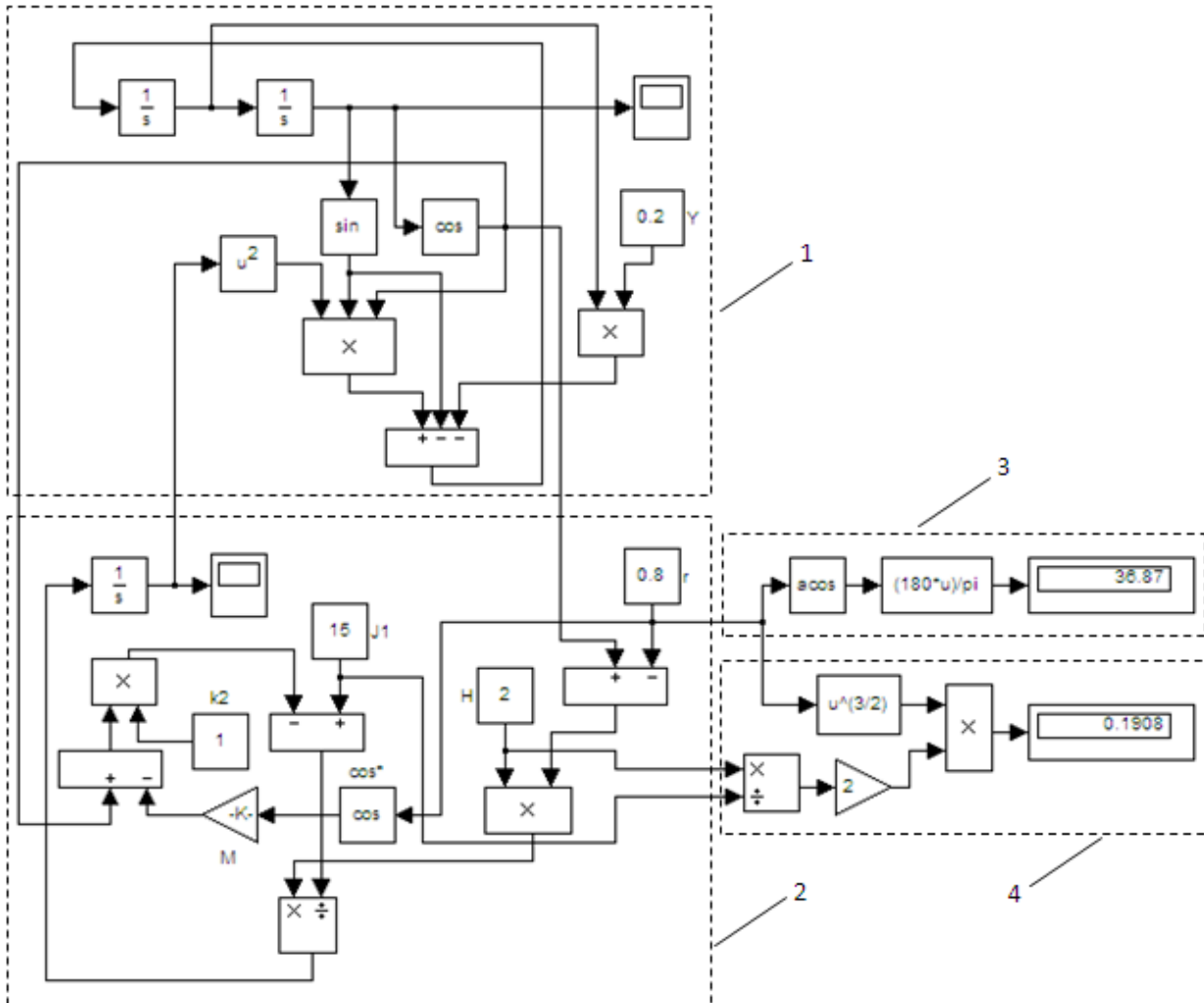


Рисунок 4 – Структурная схема модели микроГЭС

Визуализация результатов компьютерного моделирования в виде зависимостей  $\tilde{\varphi}(t)$  и  $\omega(t)$  осуществляется в соответствующих блоках.

Следует отметить, что уравнение (3) описывает динамику поведения микроГЭС с АРМИ маховиком при  $k_2 > 0$ ; с маховиком без АРМИ при  $k_2 = 0$ . При задании исходных параметров модели микроГЭС с АРМИ маховиком коэффициенту пропорциональности  $k_2$  присваивается значение, соответствующее интенсивности поступления воды в полость маховика. Задается также значение параметра  $M$ , связанное с объемом воды в полости. Чем выше интенсивность поступления воды и

объем воды в полости, тем больше и значение коэффициентов пропорциональности  $k_2$  и  $M$ .

**Заключение.** Последовательность действий пользователя для определений параметров микроГЭС (рис. 2). Возможны два варианта:

- 1) пользователь интересуется параметрами микроГЭС без АРМИ маховика;
- 2) пользователь интересуется параметрами микроГЭС с АРМИ маховиком.

В обоих случаях алгоритм действий таков: запускается MatLab/Simulink, далее в окне Simulink Library Browser, с помощью навигации File→New→Model осуществляется команда для получения новой модели с названием untitled.mdl. В появившемся окне перетаскиваются по порядку нужные блоки из библиотеки стандартных блоков (Simulink Library Browser) и соединяются между собой по линиям связи в нужной последовательности в соответствии с рис. 4. Полученная модель является структурной (S-моделью, mdl-моделью) и соответствует математической модели микроГЭС (3). Её нужно сохранить под определенным именем, например: File→Save→MkrGes.

Для первого варианта значения коэффициентов  $k_2$  и  $M$  равны нулю. Пользователю необходимо задать значения остальных параметров  $J_1$ ,  $\gamma$ ,  $H$ ,  $\rho$  модели (3). Например:  $\gamma = 0,2$ ;  $\rho = 0,7$ ;  $H = 2$ ;  $J_1 = 10$ . Для этих параметров модели результаты моделирования представлены на рис. 5.

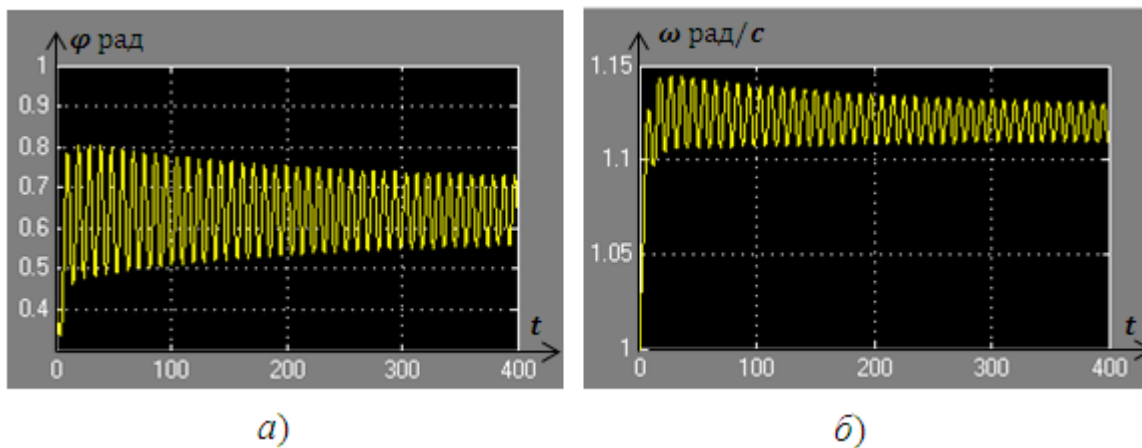


Рисунок 5 – Диаграмма зависимостей  $\varphi(t)$  и  $\omega(t)$

Из рис. 5, видно, что при этих параметрах происходит потеря устойчивости, но рождаются устойчивые периодические колебания угловой скорости вращения  $\omega$  микроГЭС (рис. 5 б). Если пользователь удовлетворен полученным результатом, устраивает, то по заданным параметрам, используя формулы (5), определяются параметры микроГЭС без АРМИ маховика.

Если полученный результат не соответствует ожиданиям пользователя, то он может выбрать конструкцию микроГЭС с АРМИ маховиком, например, при значениях  $k_2 = 1$ ,  $M = 100$ , а значения остальных параметров оставить неизменным и проверить режим работы. В этом случае, как видно из рис. 6, режим работы микроГЭС устойчив в вследствие демпфирующего свойства маховика, у которого регулируются масса и момент инерции в зависимости от скорости вращения.

Это подтверждает высокую эффективность предложенного способа стабилизации частоты благодаря изменению конструкции микроГЭС: в результате

параметры микроГЭС такие же, что в первом случае, но в конструкцию введем АРМИ маховик.

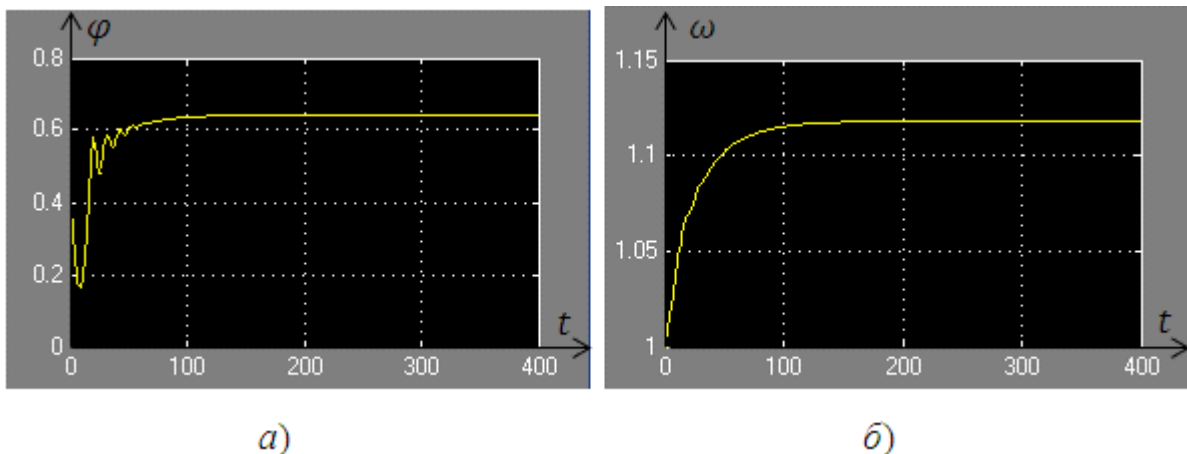


Рисунок 6 – Диаграмма зависимостей  $\varphi(t)$  и  $\omega(t)$

### Литература

1. Кушнир В.Г., Кошкин И.В., Глушко Д.В. Обоснование установки мини-ГЭС 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 микро-гидроэнергетики. Гидравлика в напорных водоводах микроГЭС // Строительство и архитектура. – 2017. – № 5. – С. 8–14.
3. Спиринов Е.А., Никитин А.А., Головин М.П., Карпенко В.В. О выборе типа микроГЭС 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: STT, 2001. – 120 с.
5. Сатаркулов К., Бакасова А.Б., Иманакунова 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. Бакасова А.Б., Сатаркулов К.А., Ниязова Г.Н., Яблочников А.М., Усубалиева Г.К. «Моделирование микроГЭС малой мощности с маховиком, автоматически регулирующим момент инерции». Информатика и системы управления. Благовещенск (РФ). 2019. – №1(59). – С. 36–45.
8. Шаршеналиев Ж.Ш., Сатаркулов К.А., Бакасова А.Б., Ниязова Г.Н. Саморегулирующийся адаптивный маховик для генераторов автономных микроГЭС // Патент Кыргызской Республики № 1743. 2015. 20140113.1 Бюл. №5 (71) (73).
9. Бакасова А.Б., Сатаркулов К.А., Ниязова Г.Н., Яблочников А.М., Усубалиева Г.К. Маховик с автоматически регулируемой массой и моментом инерции для повышения качества стабилизации частоты микроГЭС // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: Труды [Электронный ресурс] / Под общ. ред. Д.А. Новикова. – М.: ИПУ РАН, 2019. – 3286 с.

*Ч.М. Бузурманкулова, А.К. Кадиева, Э.Б. Исакеева,  
Ч.К. Дюшеева, Ж.К. Абдыбаева*

*Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,  
З.А. Узагалиев, ОАО «Северэлектро», Бишкек*

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Для оценки влияния качества электроэнергии на потери мощности в элементах электрических сетей использован пакет программ MatLab/SimPowerSystems/Simulink, обладающий многочисленной библиотекой готовых блоков, необходимых для построения моделей исследуемых систем любой сложности. В случае отсутствия требуемой модели, ее можно создать на основе блоков Simulink и блоков SPS. В работе приведены результаты компьютерного моделирования для оценки влияния нелинейного резистора и индуктивности на качество электроэнергии в электрической сети, на потери мощности и энергии в ней.

**Ключевые слова:** моделирование, MatLab/SimPowerSystems/Simulink, качество электроэнергии, потери мощности, элементы электрических сетей.

**Введение.** В процессе передачи электрической энергии по электрическим сетям неизбежны потери. При расчете потерь в них предполагается, что электрическая энергия имеет допустимое качество, но такое условие не всегда выполняется, и поэтому наблюдается увеличение потери электроэнергии в элементах сети [1–5].

Неудовлетворительное качество электроэнергии в современных распределительных сетях объясняется значительным количеством электроприемников больших мощностей с нелинейным и несимметричным характером нагрузок [6, 7] в них.

**Постановка задачи.** Достоверную информацию обо всех потерях и причинах их появления в элементах сети, можно было получить проведением натурного эксперимента в реальных электрических сетях в управляемых и контролируемых условиях. Однако, во многих случаях это нереально, так как исследователь не имеет возможности вмешиваться в производственный процесс и управлять режимами работы сети по своему желанию в соответствии с поставленными задачами исследования. В таких случаях исследуемый объект заменяется компьютерной моделью [8] и проводится численный эксперимент для изучения их поведения при изменении внешних воздействий. В связи с этим представляет интерес изучение влияния качества электроэнергии на потери в сетях, с использованием технологии компьютерного моделирования.

**Использование пакета программ MatLab/SimPowerSystems/Simulink для исследования влияния нелинейных элементов сети на качество электроэнергии и оценка последствий этого влияния.** Эти пакеты обладают рядом достоинств, например, исследователь, имеет возможность имитировать функционирование электротехнических устройств анализировать их поведение, кроме того SimPowerSystems (SPS) позволяет моделировать электротехнические системы достаточной сложности путем использования идеологии имитационного и

структурного моделирования. Эти пакеты содержат многочисленную библиотеку готовых блоков, необходимых для построения моделей исследуемых систем, однако иногда требуемая пользователю модель устройства может отсутствовать, тогда ее можно создать на основе блоков Simulink и блоков SPS [9].

Используя рекомендации данные в [9], созданы необходимые модели нелинейных резисторов и индуктивностей (насыщающегося реактора), при этом вся схема представлена на рис.1.

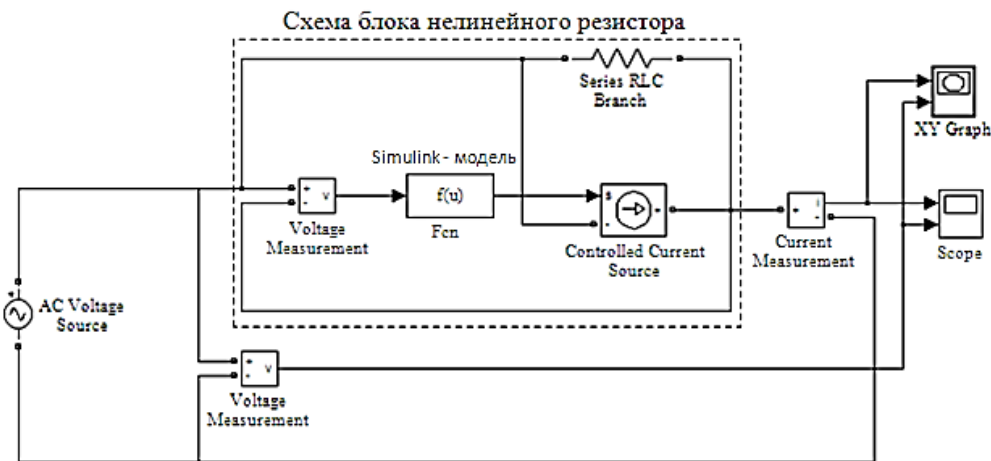


Рисунок 1 – Схема модели с нелинейным резистором

Следует, отметить, что наличие на схеме развязывающего резистора позволяет включать блоки с управляемыми источниками тока последовательно [9]. Модель - Simulink резистора реализована с помощью блока  $F_{cn}$ . Параметр этого блока задается с помощью окна (рис.2).

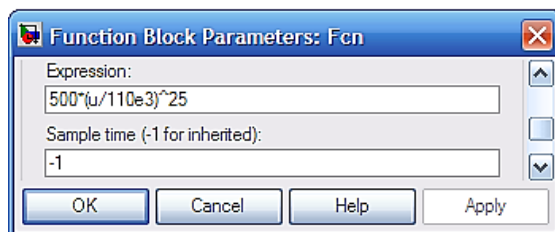


Рисунок 2 – Окно задания параметров блока  $F_{cn}$

**Модель нелинейного резистора.** Разработка блока нелинейного резистора (БНР) начинается созданием Simulink – модели, входом которой является сигнал, пропорциональный напряжению на зажимах БНР, выходом – сигнал, пропорциональный току БНР. Далее эта модель используется в его схеме (рис.1 внутренняя область пунктирного прямоугольника).

Пусть ВАХ нелинейного резистора определяется выражением [9]:

$$i = I_0 \left( \frac{u}{U_0} \right)^\alpha, \tag{1}$$

где  $i$  и  $u$  – значения тока и напряжения в момент времени  $t$ ;  $U_0$  – значение граничного напряжения;  $I_0$  – значения тока устройства, соответствующее  $U_0$ ;  $\alpha$  – параметр, определяющий степень нелинейности ВАХ резистора, значение которого обычно лежит в промежутке от 0 до 50.

Схема БНР показана на рис.1 (внутренняя область пунктирного прямоугольника). Simulink – модель резистора осуществлена с помощью  $F_{cn}$ - блока (рис.2), при следящих численных значениях параметра:  $U_0 = 110$  кВ;  $I_0 = 500$  А;  $\alpha = 25$ .

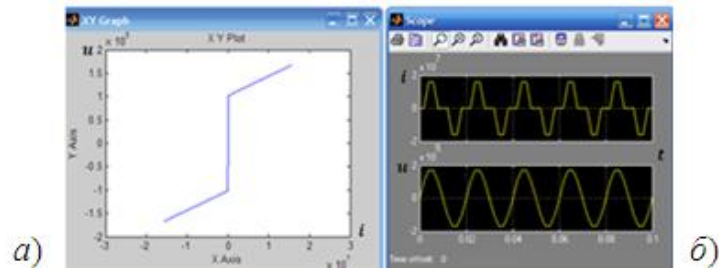


Рисунок 3 – Диаграммы работы нелинейного резистора

На схеме (рис.1) представлены: схема БНР; датчики тока и напряжения; графопостроитель XY-Graph для построения вольт-амперной характеристики резистора (рис.3 а), а также графики тока и напряжения (рис.3 б), которые иллюстрируют влияние нелинейности резистора во времени.

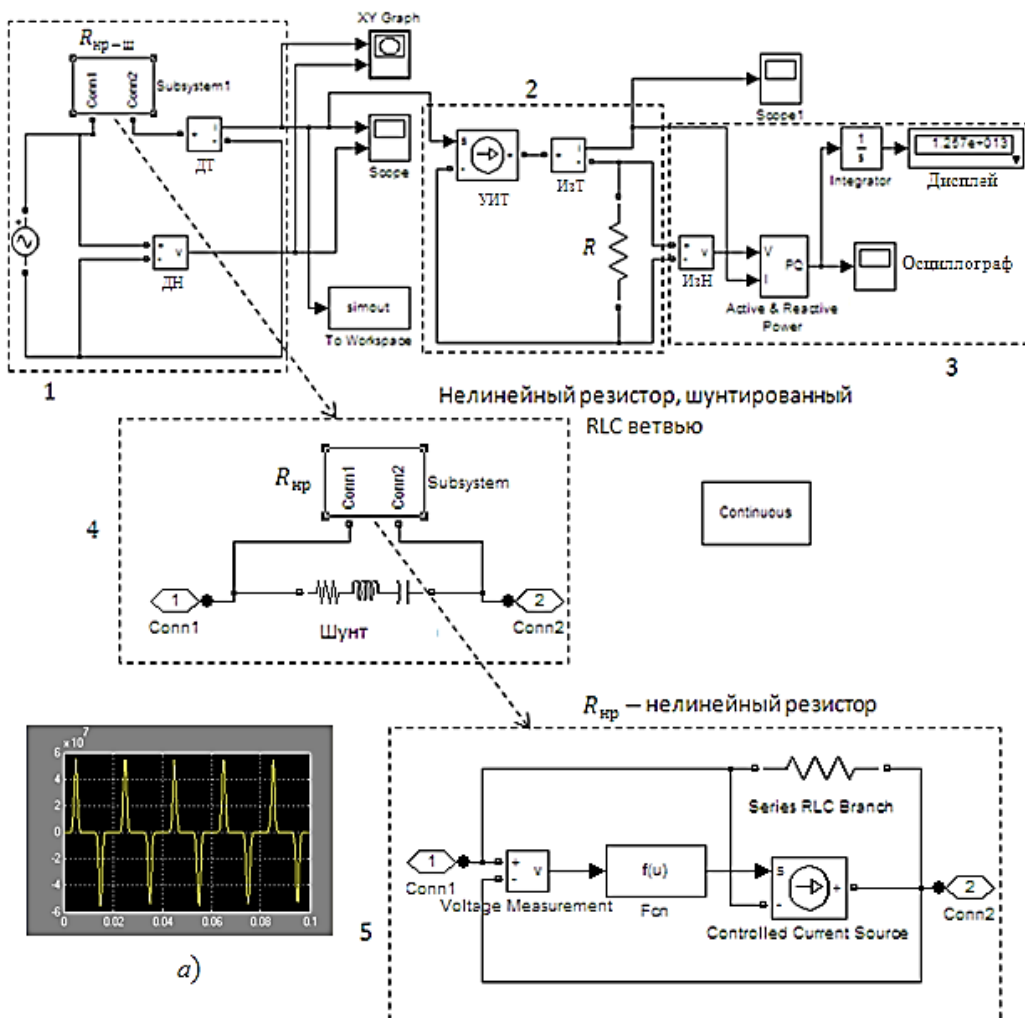


Рисунок 4 – SPS – модель исследуемой сети

Проведем исследование влияния нелинейного резистора на гармонический состав тока в сети, являющийся одним из параметров, по которому оцениваются качество электроэнергии, и потери мощности и энергии в элементе этой сети, с помощью SPS модели (рис.4). SPS – модель исследуемой сети, состоит из блоков (на рис.4 они ограничены пунктирными прямоугольниками), назначение, которых заключается в следующем: 1– формирует сигнал управления, (рис.5), который является безразмерным Simulink – сигналом, закон изменения, которого соответствует работе нелинейного резистора; 2 – схема с использованием управляемого источника тока, формирующего в нагрузке  $R$  электрический ток в соответствии с сигналом управления (рис.4, *a*); 3 – измерительный блок, в котором содержится осциллограф, показывающий временную зависимость потери мощности в  $R$ . Блок содержит и дисплей, показывающий величину потери энергии за время, равное продолжительности моделирования; 4 – содержание блока  $R_{нр-ш}$  имитирует нелинейный резистор (блок 5), шунтированный  $RLC$  – ветвью. Наличие шунта необходимо для обеспечения устойчивости функционирования нелинейного резистора, то есть для устойчивости его ВАХ.

Для оценки влияния качества электроэнергии на потери мощности в элементе электрической сети  $R$ , проведем вычислительный эксперимент (ВЭ) при следующих численных значениях параметра модели нелинейного резистора:  $U_0 = 110$  кВ;  $I_0 = 500$  А;  $\alpha = 25$ .

### Результаты численного эксперимента

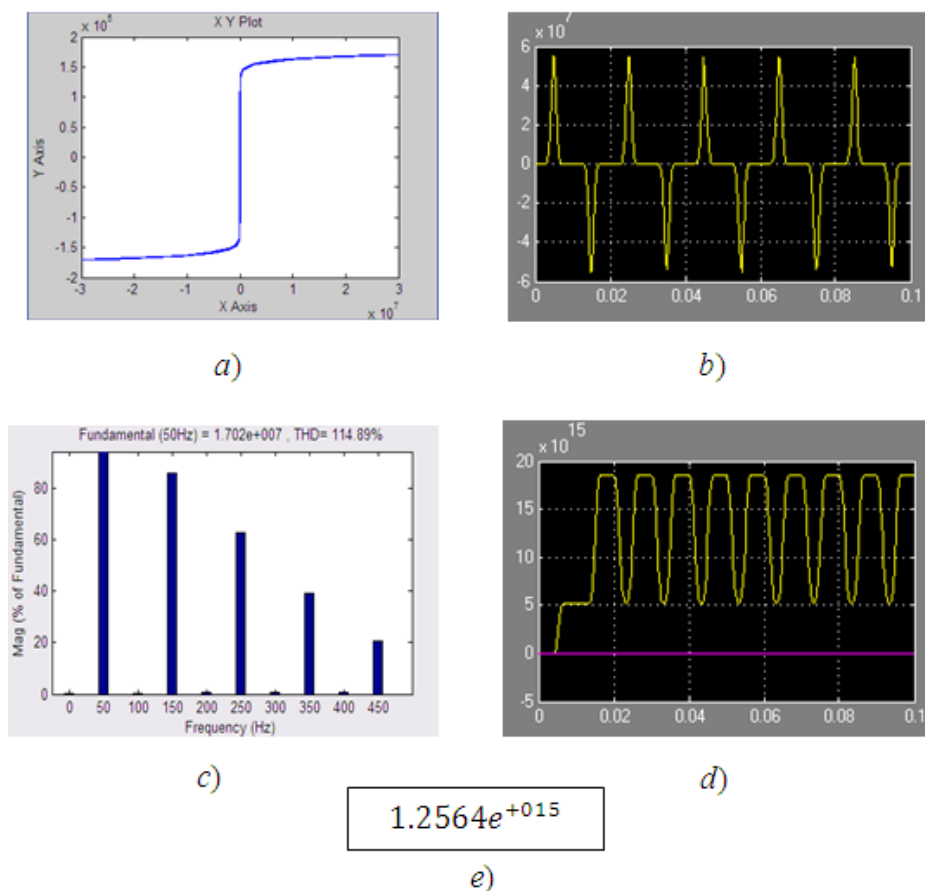


Рисунок 5 – Результаты численного эксперимента

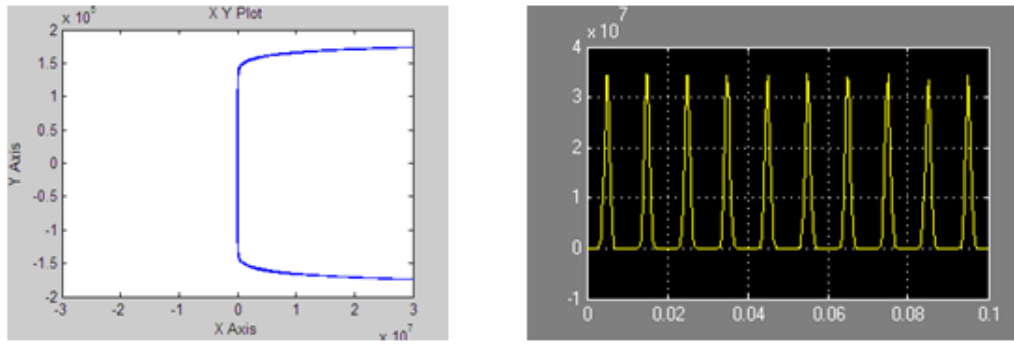
На рис.5 представлены: *a* – ВАХ нелинейного резистора, шунтированного  $RLC$  –



ветвью;  $b$ ,  $c$  – соответственно, временная зависимость и спектральный состав тока в нагрузке  $R$ ;  $d$  – временная зависимость потери мощности в нагрузке  $R$ ;  $e$  – потеря электроэнергии в нагрузке  $R$  за время, равное продолжительности моделирования.

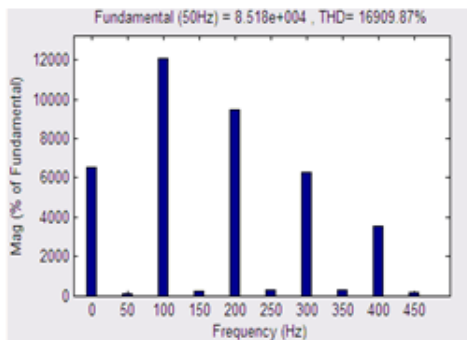
Для сопоставления повторим ВЭ при параметре модели нелинейного резистора при  $\alpha = 24$ .

**Результаты численного эксперимента при новом значении  $\alpha$**

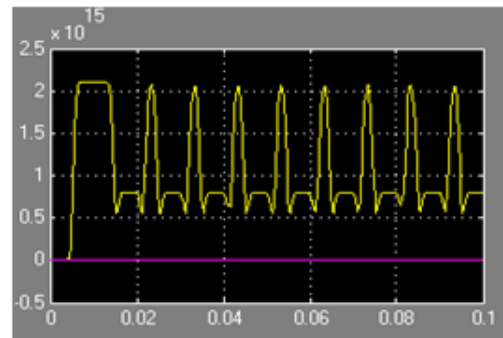


a)

b)



c)



d)

$1.0485e^{+014}$

e)

Рисунок 6 – Результаты численного эксперимента

Сопоставление результатов эксперимента (рис.5, 6) показывает, что изменение характера нелинейности НР существенно изменило спектральный состав тока в резисторе (рис.5, с и рис.6, с). Изменились и величины потерь мощности и энергии (рис.5, d, e и рис.6, d, e). Полученные результаты имеют важное практическое значение.

Проведем исследование влияния на качества и потери электроэнергии степени нелинейности индуктивности в электрической сети.

**Математическая модель нелинейной индуктивности** (насыщающего реактора). Методика создания модели нелинейной индуктивности (НИ) аналогична методике создания нелинейного резистора.

Уравнения, описывающие насыщающийся реактор [9]:

$$u = Ri + \frac{d\psi}{dt}, \tag{2}$$

$$i = a\psi + b\psi^3. \tag{3}$$

В этих выражениях  $i$ ,  $u$ ,  $\psi$  соответственно значения тока, напряжения и потоко-сцепления в момент времени  $t$ ;  $a$ ,  $b$  – параметры, характеризующие нелинейность НИ.

Выражение (2) – дифференциальное уравнение, характерное для индуктивности, а (3) – характеризует его нелинейность. Вид уравнения (3) может быть и другим в зависимости от требования к точности аппроксимации нелинейности индуктивности (реактора).

При построении Simulink–модели уравнения (2) преобразуем таким образом, чтобы в левой части осталась производная:

$$\frac{d\psi}{dt} = u - Ri. \quad (4)$$

Создадим новую модель untitled.mdl с помощью навигации File – New – Model.

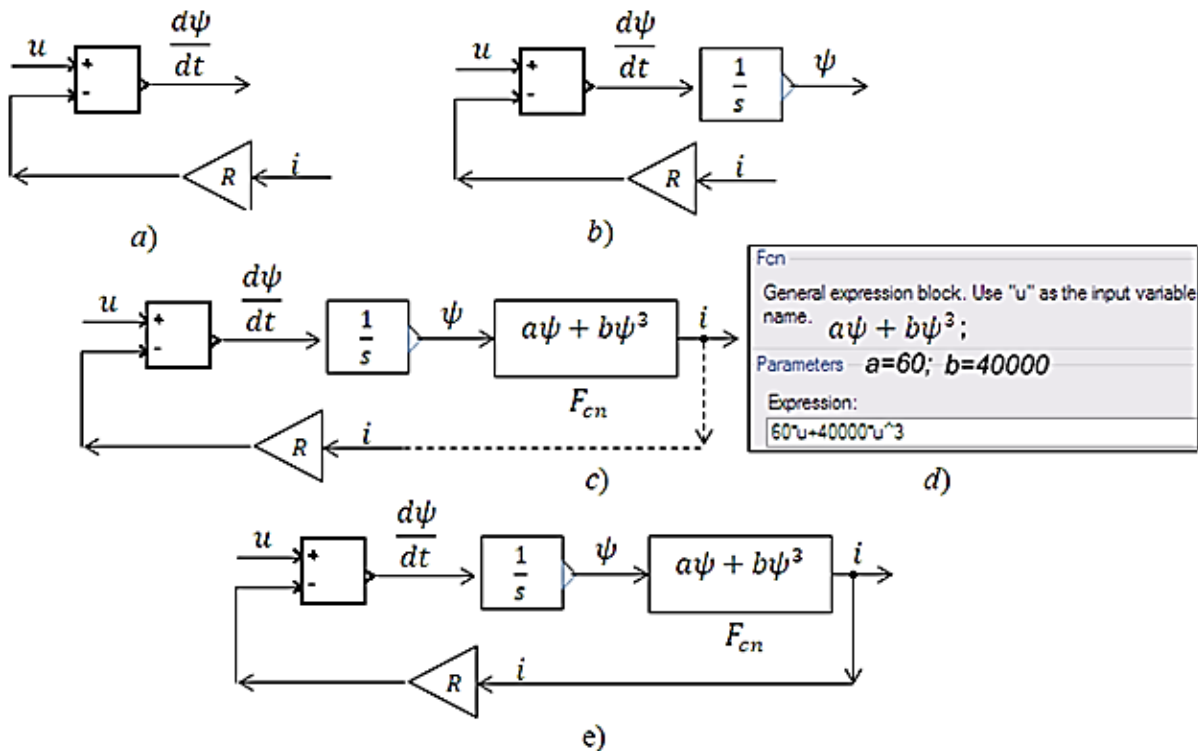


Рисунок 7 – Последовательность построения математической модели нелинейной индуктивности

В появившееся окно перетащим блок суммирования – **Sum**, блок усилителя – **Gain**, назначение которого – выполнять умножение входного сигнала на постоянный коэффициент, и реализуем математические операции над величинами  $u$ ,  $R$ ,  $i$ , в соответствии с правой части (4). В результате на выходе блока суммирования формируется производная по времени от потокосцепления (рис.7, a):  $d\psi/dt$ .

Для получения текущего значения потокосцепления  $\psi$  значение производной  $d\psi/dt$  подадим на вход блока интегратора, предварительно перетащив этот блок из библиотеки Simulink (рис.7, b).

Simulink – модель выражения (3) осуществляем с помощью  $F_{cn}$ – блока (рис.7, c), где окно задания параметров этого блока представлено на рис.5, d.

Значения коэффициентов нелинейной зависимости между потокосцеплением и током и величина активного сопротивления индуктивности (реактора) приняты:  $a = 60$ ,  $b = 40000$ ,  $R = 2$  Ом. После подстановки этих величин Simulink – модель насыщающегося реактора (индуктивности) имеет вид (рис. 8).

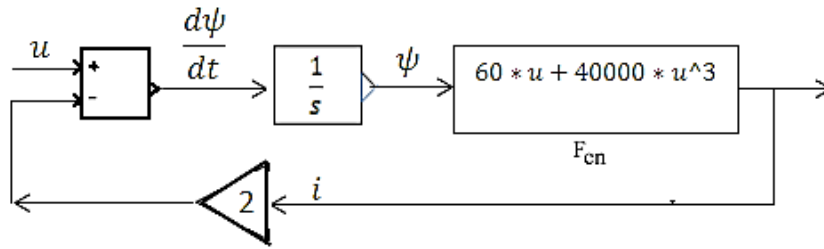


Рисунок 8 – Simulink – модель насыщающего реактора (индуктивности)

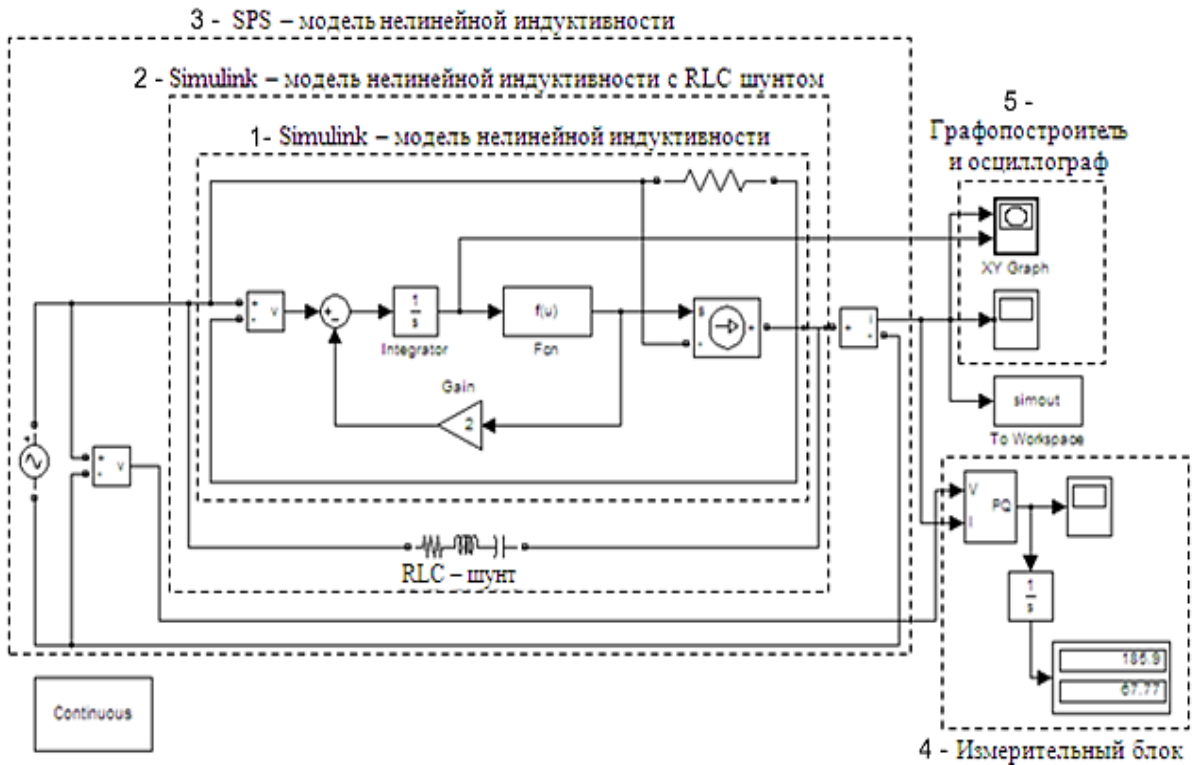


Рисунок 9 – SPS – модель нелинейной индуктивности (насыщающего реактора)

На рис.9. показаны: 1– Simulink модель НИ; 2 – Simulink модель НИ шунтированная  $RLC$  ветвью. Назначение шунта – обеспечивать устойчивую работу НИ, т.е. устойчивость вебер-амперной характеристики; 3 – SPS модель НИ; 4 – измерительный блок, содержащий осциллограф и дисплей в, которых отображаются – на осциллографе временная зависимость значения потерь активной и реактивной мощностей; на дисплее потери энергии за время, равное продолжительности моделирования; 5 – в этом блоке содержатся графопостроитель и осциллограф, где отображаются вебер-амперная характеристика НИ и временная зависимость величины тока в НИ.

Проведем численный эксперимент для оценки влияния степени нелинейности НИ на спектральный состав тока проходящего через него, и на величину потерь мощности и энергии, в нем при значениях коэффициентов  $a = 60, b = 40000$  и  $R = 2$  Ом, в выражениях (2, 3).

**Результаты численного эксперимента**

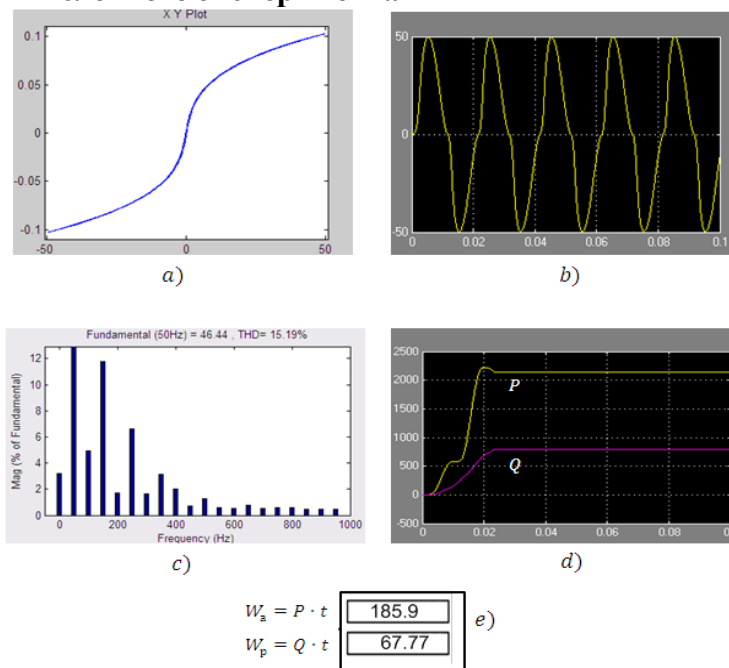


Рисунок 10 – Результаты численного эксперимента

На рис.10 изображены: *a* – вебер-амперная характеристика НИ; *b* – временная зависимость тока текущий через НИ; *c* – спектральный состав тока текущий через НИ; *d* – временная зависимость потери активной *P* и реактивной *Q* мощностей в НИ; *e* – потери активной  $W_a$  и реактивной  $W_p$  энергии в течении времени равному продолжительности моделирования.

Проведем повторный эксперимент при тех же значениях  $a = 60$ ,  $b = 40000$  и  $R = 2$  Ом, но при другой степени нелинейности индуктивности (насыщающего реактора). Для этого примем показатель степени в выражении (3) равным пяти.

**Результаты эксперимента** представлены на рис.11(*a, b, c, d*).

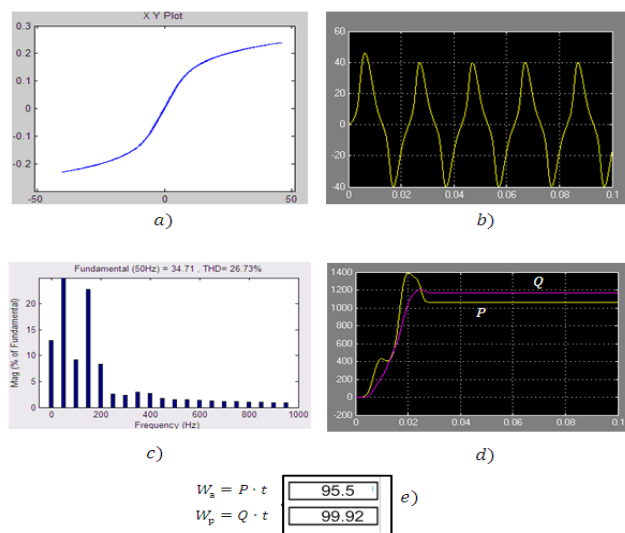


Рисунок 11 – Результаты численного эксперимента при другой степени нелинейности НИ

Сопоставление результатов эксперимента (рис.10, 11) доказывает существенное влияние степени нелинейности насыщающего реактора на все процессы, происходящие в цепи, содержащей НИ.

**Заключение.** Используя методы, изложенные в работе [9], созданы модели нелинейного резистора и индуктивности. В процессе вычислительного эксперимента выявлена неустойчивость работы этих моделей при некоторых параметрах модели, что отразилось на неустойчивости вольт-амперной характеристики нелинейного резистора и вебер-амперной характеристики нелинейной индуктивности. В результате невозможно было исследовать влияние степени нелинейности этих элементов цепи на гармонический состав тока в нем.

Использование  $RLC$  – шунта в моделях нелинейных элементов сняло эти трудности. В результате, с помощью разработанных моделей нелинейных элементов цепи, можно составлять схемы с этими элементами и исследовать их влияние на качество электрической энергии и влияние качества на потери мощности и энергии в элементах цепи.

### **Литература**

1. Тимчук С. А., Мирошник А. А. Определение потерь электроэнергии в зависимости от ее качества в нечеткой форме в сельских распределительных сетях // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т.1, №8 (73). С. 4–10.
2. Боровиков В.С., Харлов Н.Н. Оценка добавочных потерь активной мощности и электроэнергии в линиях с высоким коэффициентом искажения синусоидальности тока // <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Conferences/2010/K02/1001.pdf>.
3. О необходимости включения добавочных потерь от высших гармоник тока в технологические потери при передаче электрической энергии / В. С.Боровиков, Н.Н. Харлов, Т.Б. Акимжанов. // Известия Томского политехнического университета / Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск, 2013. – Т. 322, № 4: Энергетика. – С. 91–93.
4. Айдарова А.Р., Байбагысова Д.Ж., Усубалиева Г.К. Исследование влияния различных факторов на величину нагрузочных потерь энергии в элементах электрической сети // Проблемы автоматки и управления. 2015. № 1 (28). С. 61–66.
5. Айдарова А.Р., Байбагысова Д.Ж., Кадиева А. Решение задач моделирования при исследовании потерь в элементах электрической сети с применение Labview // Проблемы автоматки и управления. 2015. № 1 (28). С. 67–71.
6. Карташев И. И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения [Текст] / И. И. Карташев; под ред. М. А. Калугиной. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 120 с.
7. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов [Текст] / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
8. Массов А.А., Козлов П.М., Кумаритов Б.Х., Кирилин И.В. Создание имитационной модели для выявления искажений форм кривых токов и напряжений в сетях рудников // Промышленная Энергетика, 2011, – 5, с. 44–49.
9. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с. с ил.

*К.А. Пресняков, Г.К. Керимкулова, Г.О. Аскалиева, Е.Ю. Першакова*  
*Институт машиноведения и автоматизации НАН КР, г. Бишкек.*  
*[gulsaat@mail.ru](mailto:gulsaat@mail.ru), [87guzuza@mail.ru](mailto:87guzuza@mail.ru)*

## **МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ «РАССТОЯНИЯ НЕЗАВИСИМОСТИ» КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА ВОДЫ ДРУГ ОТ ДРУГА, ИЗМЕРЯЕМЫХ В ДВУХ СОСЕДНИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТОЧКАХ**

Предложен метод определения «расстояния независимости» кинематических характеристик потока воды друг от друга, измеряемых в двух соседних измерительных точках. Предлагаемые значения указанного «расстояния независимости» основаны на использовании или длины пути смешения, или поперечного масштаба турбулентности, или на эмпирическом значении «расстояния независимости» вдоль которого коэффициент корреляции между измеряемыми характеристиками изменяется от единицы до нуля. В результате анализа указанных вариантов значений удастся установить их область применимости.

**Ключевые слова:** путь смешения, продольная компонента, вертикальная компонента, скорость, расстояние независимости, турбулентность, корреляция.

**Введение.** Известен способ определения «расстояния независимости» кинематических характеристик потока воды друг от друга, измеряемых в двух соседних измерительных точках [1], заключающийся в синхронном измерении продольной компоненты скорости воды в двух соседних измерительных точках в продольном направлении и определении координаты точки, в которой коэффициент корреляции измеренных значений указанной характеристики равен нулю [2, конкретная ссылка стр. 250].

**Постановка задачи исследований.** Недостатком известного метода является то обстоятельство, что в нем нет конкретных указаний по определению «расстояния независимости» кинематических характеристик потока воды друг от друга в продольном направлении, измеряемых в двух соседних измерительных точках.

**Задача исследования:** определение «расстояния независимости» пульсаций вертикальной компоненты скорости воды, измеряемых в двух соседних измерительных точках по вертикали.

**Решение поставленной задачи.** В вышеуказанном методе определения «расстояния независимости» кинематических характеристик потока воды друг от друга, измеряемых в двух соседних измерительных точках, заключающемся в синхронном измерении продольной компоненты скорости воды. Измерения проводятся в двух соседних измерительных точках в продольном направлении и определяются координаты точки, в которой коэффициент корреляции измеренных значений

указанной характеристики равен нулю. Предлагается метод, в котором синхронно измеряют пульсации вертикальной компоненты скорости воды в двух соседних измерительных точках по вертикали, причем подобные измерения проводят для случаев различных расстояний между измерительными точками. По результатам измерений строят график зависимости коэффициента корреляции от расстояния между измерительными точками. Находят на графике точку, где коэффициент корреляции или равен нулю, или близок к нулю, или изменяет свой знак на противоположный, а разность координат в точке 1 и в точке нулевой корреляции считают «расстоянием независимости» пульсаций вертикальной компоненты скорости воды друг от друга, измеряемых в двух соседних измерительных точках.

Подобное исполнение метода определения «расстояния независимости» кинематических характеристик потока воды друг от друга, измеряемых в двух соседних измерительных точках, позволяет обоснованным образом найти координату точки, в которой коэффициент корреляции пульсаций вертикальной компоненты скорости воды, измеренный в двух соседних измерительных точках по направлению вертикали или равен нулю, или близок к нулю, или изменяет свой знак на противоположный.

Обоснование предлагаемого метода определения «расстояния независимости» кинематических характеристик потока воды друг от друга, измеряемых в двух соседних измерительных точках осуществляют следующим образом.

В гидродинамике известна формальная аналогия между явлениями физической диффузии и турбулентной диффузии [2, конкретная ссылка стр. 271], которая позволяет сопоставить между собой длину свободного пробега молекулы и длины пути смешения (перемешивания).

Согласно закономерностям физической диффузии следует, что на протяжении длины свободного пробега (а точнее в конце ее, т.е. в результате столкновения молекул друг с другом) происходит окончание акта индивидуального обмена количества движения между молекулами.

Применительно к явлению турбулентной диффузии можно полагать, что подобный акт обмена в случае турбулентной диффузии происходит в конце длины пути смешения (перемешивания).

В тоже время в литературе [3, конкретная ссылка стр. 113, §25] существует понятие поперечных масштабах турбулентности, которые можно также полагать как отрезки пути, в конце которого заканчивается процесс обмена количеством движения между отдельными объемами воды. Кроме того в гидродинамике [2, конкретная ссылка стр.250] содержится указание на то, что в случае малого расстояния между соседними измерительными точками коэффициент корреляции между продольными компонентами скорости воды, измеряемыми в двух соседних измерительных точках, равен нулю.

Следовательно, имеем три разных суждения о «расстоянии независимости» между продольными компонентами скорости воды, измеряемыми в двух соседних измерительных точках в продольном направлении.

В тоже время необходимо принять во внимание следующие обстоятельства: в первом методе осуществляют анализ отношений между продольными компонентами скорости воды, измеряемыми в продольном направлении, в нашем случае речь идет о пульсациях вертикальной компоненты скорости воды, измеряемых в вертикальном

направлении. Таким образом, мы предлагаем определять «расстояния независимости» по результатам измерений пульсаций вертикальной компоненты скорости воды, измеряемых в двух соседних измерительных точках по вертикали.

Структурная блок-схема метода определения «расстояния независимости» кинематических характеристик потока воды друг от друга, измеряемых в двух соседних измерительных точках состоит из 7-ми блоков (рисунок):



Рисунок – Структурная блок-схема предлагаемого метода определения «расстояния независимости» кинематических характеристик потока воды друг от друга, измеряемых в двух соседних измерительных точках.



- синхронных измерений вертикальной компоненты скорости воды в двух соседних измерительных точках (1, 2) в течение промежутка времени  $\Delta t$  (блок 1);
- определения пульсаций измеренной вертикальной компоненты скорости воды в указанных точках в упомянутом промежутке времени (блок 2);
- вычисления коэффициента линейной корреляции между измеренными пульсациями вертикальной компоненты скорости воды в точках 1, 2 в течение промежутка времени  $\Delta t$  (блок 3);
- повторения подобного цикла измерений для случаев, когда координата точки 1 фиксирована, а координату точки 2 варьируют (при достижении числа вариантов не менее 5) (блок 4);
- графического построения полученных результатов в координатах «коэффициент корреляции, расстояние между измерительными точками» (блок 5);
- поиска координаты точки, в которой коэффициент корреляции или равен нулю, или близок к нулю, или меняет свой знак на противоположный (блок 6);
- определения «расстояния независимости» как разность между координатой точки 1 и координатой точки нулевой корреляции (блок 7).

Метод определения «расстояния независимости» кинематических характеристик потока воды друг от друга, измеряемых в двух соседних измерительных точках, реализуют следующим образом:

- блок 1– синхронно измеряют вертикальные компоненты скорости воды в двух соседних измерительных точках (1, 2) в течение промежутка времени  $\Delta t$ ;
- блок 2– определяют пульсации измеренной вертикальной компоненты скорости воды в указанных точках в упомянутом промежутке времени;
- блок 3 – вычисляют коэффициенты линейной корреляции между измеренными пульсациями вертикальной компоненты скорости воды в точках 1, 2 в течение промежутка времени  $\Delta t$ ;
- блок 4 – повторяют подобный цикл измерений для случаев, когда координата точки 1 фиксирована, а координату точки 2 варьируют (при достижении числа вариантов не менее 5);
- блок 5 – строят графически полученные результаты в координатах «коэффициент корреляции, расстояние между измерительными точками»;
- блок 6 – проводится поиск координаты точки, в которой коэффициент корреляции или равен нулю, или близок к нулю, или меняет свой знак на противоположный;
- блок 7– определяют «расстояние независимости», как разность между координатой точки 1 и координатой точки нулевой корреляции.

**Заключение.** Предложен метод определения «расстояния независимости» кинематических характеристик потока воды друг от друга, измеряемых в двух соседних измерительных точках. Предлагаемые значения указанного «расстояния независимости» основаны на использовании или длины пути смешения, или поперечного масштаба турбулентности, или на эмпирическом значении «расстояния независимости» вдоль которого коэффициент корреляции между измеряемыми характеристиками изменяется от единицы до нуля. В результате анализа указанных вариантов значений удастся установить их область применимости.

### *Литература*

- 1 Заявка на выдачу патента КР вх. 3535 от 08.07.2019г. Способ определения «расстояния независимости» кинематических характеристик потока воды друг от друга, измеряемых в двух соседних измерительных точках / Пресняков К.А., Керимкулова Г.К., Аскалиева Г.О., Першакова Е.Ю.
- 2 М.А.Великанов. Динамика русловых потоков, Т.1 Структура потока. М.: Госиздат техн.-теор. лит., 1954, 323 с.
- 3 Минский Е.М. Турбулентность руслового потока. – Л.: ГИМИЗ, 1952.–164с.

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ И ПРОЦЕССАМИ

---

УДК 681.51

10.5281/zenodo.3594812

**Ж. Ш. Шаршеналиев, А.Б. Бакасова**  
Институт машиноведения и автоматизации НАН КР  
[bakasovaaina@mail.ru](mailto:bakasovaaina@mail.ru)

### О НОВОМ ПОДХОДЕ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИНВАРИАНТОВ В ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ

Работа иллюстрирует на модельном объекте применение нового метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов колебаний (АКАРК) синергетической теории управления. Отличительной особенностью данного подхода является единообразный выбор инвариантных многообразий (ИМ) на основе энергетических инвариантов в виде энергии синтезируемой системы или её первых интегралов движения, что позволяет решить обширный класс задач управления нелинейными регулярными и хаотическими колебаниями. Преимуществом метода АКАРК является получение законов управления в аналитической форме.

Ключевые слова: синергетическая теория управления, синтез, энергетические инварианты, нелинейные колебания, метод АКАРК (аналитическое конструирование агрегированных регуляторов колебаний)

**Введение.** Проблема управления колебательными процессами в системах разнообразной природы стала одной из актуальных проблем исследования нелинейной динамики и синергетики – науки о процессах самоорганизации в сложных системах.

Современная теория управления обладает обширным количеством теорий и методов присущих различным научным направлениям и эффективных в решении разнообразных задач управления нелинейными и хаотическими системами и колебаниями. Принципиально иным направлением нелинейного управления колебательными процессами в сложных динамических системах является синергетическая теория управления (СТУ), которая базируется на таких фундаментальных понятиях, как *инвариантные многообразия, нелинейность и асимптотическая устойчивость* [1–6].

Одним из фундаментальных базовых положений СТУ является инвариантное многообразие (ИМ). Применение ИМ для решения задач управления различными динамическими объектами основывалось на глубокой аналогии между процессами в естественных системах и в управляемых искусственных системах. Указанная аналогия следует из фундаментальных принципов сохранения в физике: закона сохранения энергии, закона сохранения количества движения (импульса), закона сохранения момента количества движения, закона сохранения массы и т.д. ИМ, присущие

синтезируемым системам, представляют собой функции, которые во время движения не изменяются в силу указанных законов сохранения [1,2].

Гладкая поверхность в пространстве координат  $x_1, \dots, x_n$  называется инвариантным (интегральным) многообразием системы, если произвольная траектория, имеющая хотя бы одну общую точку с этой поверхностью, целиком ей принадлежит.

Функция  $\Psi(x_1, \dots, x_n)$ , определяющая ИМ  $\Psi = 0$ , называется агрегированной макропеременной функции  $\Psi(x_1, \dots, x_n)$  [1,2].

Отличительной особенностью синергетического подхода в теории управления состоит не в поиске первых интегралов и инвариантных соотношений, как это делается в классической механике, а в их преднамеренном введении в структуру синтезируемой системы, которая динамически точно декомпозируется на подсистемы с соответствующими связями между ними. Например, для конкретного применения методов СТУ в технических системах, с точки зрения энергосбережения следует выделить некоторую целесообразную совокупность инвариантов – аттракторов (притягивающие предельные множества), которые характеризуют связь локальных и глобальных динамических свойств процессов самоорганизации в системе. Такими аттракторами являются энергетические и технологические инварианты, отражающие целостные свойства системы соответствующей природы. Энергетический или технологический аттрактор определяет сущность процессов, а их истинное понимание состоит в самоуправлении и самоорганизации в соответствии с поставленной целью эффективного использования энергии в технических системах [1,2].

Энергетические инварианты – это некоторые внутренние инвариантные соотношения системы, на которых обеспечиваются законы сохранения энергии или достигается минимум диссипации энергии.

Технологические инварианты являются внешними ограничениями или критериями, поддающимися описанию в понятиях минимизируемых или сохраняющихся величин и соответствующих законов, отражающих природу технической системы. Целенаправленное формирование энергетических и технологических инвариантов позволяет осуществить целевой (направленный) способ самоорганизации [1–3].

**Целью данной работы** является иллюстрация применения метода АКАРК СТУ базирующегося на использовании желаемой энергии в качестве целевых аттракторов синтезируемых систем для синтеза упорядочивающего закона управления нелинейными колебательными системами с хаотической динамикой.

В теории управления нелинейными колебаниями можно выделить две ключевые проблемы [8–10]:

1. Проблема генерации устойчивых нелинейных колебаний, т.е. проблема синтеза нового класса генераторов регулярных колебаний с заданными свойствами, которые широко распространены в разных областях науки и техники – в теории автоколебаний, в радиотехнике, электромеханике и т.д.

2. Проблема «подавления» внешних нежелательных колебаний и обеспечение в синтезируемой системе либо колебаний с желаемыми свойствами, либо существенное или полное их подавление (электромеханика, электроэнергетика, авиация, транспорт и т.д.).

В методе АКАРК с единых теоретических позиций рассматриваются две указанные важные и взаимосвязанные проблемы управления нелинейными колебаниями – проблемы синтеза генераторов с заданными свойствами и проблемы полного или частичного подавления внешних колебаний, действующих на объект соответствующей природы.

В работах [8–10] для решения этих проблем предложен новый метод *аналитического конструирования агрегированных регуляторов колебаний* (АКАРК) применительно к обширному классу нелинейных объектов с регулярными и хаотическими колебаниями.

В СТУ [1–3] при управлении нелинейными сложными объектами одной из ключевых задач является выбор и обоснование ИМ – целевых аттракторов  $\psi = 0$ . С учетом значительного разнообразия задач управления, эта ключевая задача в методе АКАР СТУ не является регулярной процедурой, а носит самостоятельный характер, связанный со спецификой нелинейных объектов, например, в электроэнергетике, электромеханике, робототехнике, авиации, космонавтике и т.д. Поэтому в методе АКАР отсутствует единая, формальная процедура выбора ИМ – технологических инвариантов и управление зависит от умения разработчика системы, от его понимания конкретной технологической задачи [6,7].

Отличительной особенностью метода АКАРК от других методов СТУ является единообразный выбор энергетических инвариантов в виде энергии синтезируемой системы или её первых интегралов движения, что позволяет решить обширный класс задач управления нелинейными колебаниями.

**Базовые положения методов АКАР и АКАРК.** В СТУ основные принципы управления колебательных систем с регулярно-хаотической динамикой основаны на использовании методов АКАР и АКАРК. Управление происходит по следующему алгоритму [9–11]:

1. Записывается исходная модель объекта, а затем к исходной модели добавляются модели, отражающие внутренние и внешние возмущения:

*Исходная система:* объект – внешние силы:

$$\dot{x}(t) = F(x, u, q, J, M). \quad (1)$$

2. Строится математическая модель в виде расширенной системы дифференциальных уравнений:

*Расширенная система:* объект – закон управления

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= F(x, u, w); \\ \dot{w}(t) &= G(x, w), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\dot{x}(t)$  – вектор переменных состояния,  $u(x)$  – вектор управлений,  $q(t)$  – вектор задающих воздействий,  $M(t)$  – вектор внешних возмущений,  $w(t)$  – вектор переменных состояния модели возмущений,  $J(t)$  – вектор параметрических возмущений. **Уравнение (2) является уравнением самоорганизации.** При построении уравнений самоорганизации (2) возникают две самостоятельные задачи: описания реальных возмущений как частных решений дополнительных

дифференциальных уравнений и формирования связей между уравнениями исходного объекта и уравнениями возмущений.

Для решения этих задач необходимо исключить в исходной системе (1) внешние силы  $[\mathbf{u}(t), \mathbf{q}(t), \mathbf{J}(t), \mathbf{M}(t)]$  и, замкнув систему прямыми и обратными связями, получить расширенную модель объекта (2). Тогда внешние по отношению к объекту силы становятся **внутренними силами взаимодействия** открытой расширенной системы с протеканием энергии, вещества или информации от источника синтезируемых управлений, следовательно получим замкнутую систему с неравновесной ситуацией, уравнение которой станут базовыми уравнениями формируемой самоорганизации. Таким образом, систему (2) можно считать **моделью синергетического синтеза систем управления нелинейными колебаниями**.

**Постановка задачи.** Построенная расширенная модель (2) позволяет поставить задачу синтеза законов управления: требуется найти такой закон управления  $\mathbf{u}(x_1, x_2)$ , в виде совокупности нелинейных обратных связей, которая обеспечивает перевод изображающей точки (ИТ) расширенной системы (2) из произвольного исходного состояния (в некоторой допустимой области) сначала на целевые энергетические ИМ,  $\psi_s(x) = 0$ , которых может быть несколько. В этом случае движение ИТ должно удовлетворять системе дифференциальных уравнений  $\dot{\psi}_s(x) = 0$ , которые можно назвать функциональными или эволюционными. Затем, в результате асимптотически устойчивого движения вдоль пересечения многообразий  $\psi_s(x) = 0$ , система попадает на целевые колебательные аттракторы, гарантирующие выполнение заданных требований: генерацию или подавление колебаний.

**Отличительные особенности метода АКАРК.** К существенным отличиям метода АКАРК относятся [8-10]:

1. Использование ИМ (макропеременных) в виде  $\psi_1 = E$  (где  $E$  – энергия) и в виде первого интеграла движения синтезируемой колебательной системы  $\psi_2 = \psi_{\text{ин}}$ .
2. Использование основных инвариантных соотношений вида:

$$\begin{aligned} T_1 \dot{\psi}_1(t) + \psi_1 x_i^2 &= 0, \\ T_2 \dot{\psi}_2(t) + \psi_2 \varphi &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Соотношения (3) обладают свойством асимптотической устойчивости по Ляпунову относительно энергетического инварианта  $\psi_1 = 0$  ( $\psi_2 = 0$ ) при  $T_1 > 0$  ( $T_2 > 0$ ). Это означает, что изображающая точка (ИТ) синтезируемой колебательной системы неизбежно попадает на желаемые ИМ  $\psi_1 = 0$  ( $\psi_2 = 0$ ) – колебательные аттракторы системы, здесь реализуется баланс кинетической и потенциальной энергии, т.е. в результате диссипативно-консервативного взаимодействия возникают автоколебания, амплитуда которых определяется желаемой величиной энергии.

3. Метод АКАРК по сравнению с методом ФОР (функционал обобщенной работы) имеет более ясное физическое содержание в отношении критериев

оптимального управления. На траекториях движения замкнутой системы достигается минимум сопровождающего оптимизирующего функционала (СОФ), вида [10]

$$J_{\Sigma} = \int_0^{\infty} \left[ \sum_{s=1}^m \varphi_s^2(\psi_s) + \sum_{s=1}^m T_s^2 \dot{\psi}_s^2(t) \right] dt, \quad (4)$$

где  $\psi(t)$  – энергия синтезируемой колебательной системы;  $\dot{\psi}(t)$  – мощность синтезируемой колебательной системы.

Как отмечено в работе [10], критерии оптимальности в методе АКАРК могут быть представлены в виде (4). Это означает, что критерий оптимальности в методе АКАРК в большей мере, чем в методе ФОР, отражает конкретное физическое содержание задач синтеза законов управления агрегированных регуляторов колебаний, а метод АКАРК применим и к неустойчивым нелинейным объектам.

В методе АКАРК формирование устойчивых нелинейных колебаний реализуется путем введения таких «внутренних» управлений в нелинейном объекте, которые преобразуют уравнения его модели таким образом, чтобы желаемая координата, отражающая технологический процесс в системе, неизбежно выходила на режим устойчивых колебаний с заданными свойствами. Применение такого рода нелинейных преобразований путем введения соответствующих «внутренних» управлений – **механизмов диссипативно-консервативных взаимодействий** является **новым** в теории синтеза систем управления нелинейными колебаниями и существенным образом отличают метод АКАРК от других методов [10].

Рассмотрим примеры применения метода АКАР и АКАРК для синтеза законов управления нелинейными объектами (системами).

*Пример 1.* Исходная модель системы (объекта управления) имеет вид [2,11]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2 \\ \dot{x}_2(t) &= u \end{aligned} \quad (5)$$

К задачам, описываемым уравнением (5), относятся задачи управления движением материальной точки относительно центра масс, в частности, процессы ориентации космических летательных аппаратов (КЛА) [2].

Введем в систему энергетическую макропеременную (аттрактор) в виде динамики колеблющегося маятника [11]

$$\psi_1 = 0,5x_2^2 + 0,5\omega^2 x_1^2 - a. \quad (6)$$

Известно, что соотношение (6) – это основной интеграл классической гамильтоновой механики, сыгравший выдающуюся роль в ее становлении и развитии. Поэтому использование (6) в методе АКАР в качестве одного из базовых инвариантов представляется вполне объяснимым [2]. Здесь  $0,5\omega^2 x_1^2 > 0$  – определенно-положительная функция относительно  $x_1$ ,  $a$  – желаемый уровень энергии в синтезируемой системе, который определяет размах колебаний системы.

Согласно методу АКАР, подставив (6) в основное функциональное уравнение (ОФУ)

$$T_1 \dot{\psi}_1(t) + \psi_1 = 0 \quad (7)$$

и в силу уравнений (5) и (6) и используя ОФУ (7), найдем закон обратной связи

$$u = 0,5 \frac{-2T_1 \omega^2 x_1 x_2 - x_2^2 - \omega^2 x_1^2 + 2a}{T_1 x_2}. \quad (8)$$

Результаты моделирования замкнутой системы управления системой (5) с регулятором (8) при  $T_1=1$ ,  $a=5$ ,  $\omega=10$  представлен на рис.1.

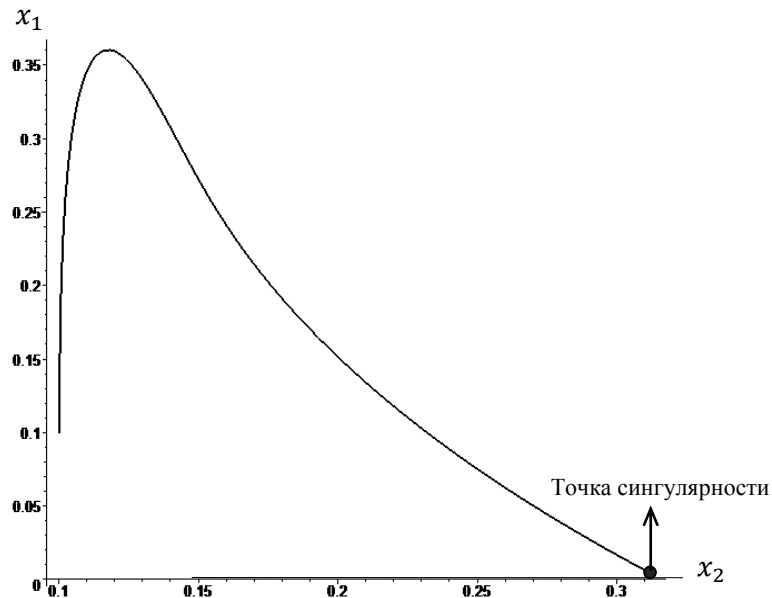


Рисунок 1 – Фазовый портрет замкнутой системы

На рис. 1 видно, что график движения ИТ пересекает абсциссу  $x_2$  и точка пересечения является *точкой сингулярности*. Это означает, что не выполняются условия асимптотической устойчивости т.е. по закону управления (8)  $x_2 = 0$ ,  $u = \infty$ . Поэтому в методе АКАРК необходимо использовать в качестве ОФУ соответствующее инвариантное соотношение (3). Это объясняется тем, что, как отмечено в работе [10], в результате диссипативно-консервативного взаимодействия в диссипативной системе  $T_1 \dot{\psi}_1(t) + \psi_1 x_i^2 = 0$  функция  $\psi_1 = 0$  - это притягивающее инвариантное многообразие, на котором возникают устойчивые колебательные процессы с заданными свойствами.

*Пример 2.* Рассмотрим процедуру синтеза законов управления методом АКАРК для объекта управления (5).

Требуется синтезировать закон обратной связи  $u(x_1, x_2)$ , обеспечивающий в фазовом пространстве замкнутой системы существование соответствующих гармонических аттракторов – устойчивых предельных циклов с желаемой амплитудой и частотой автоколебаний.

Согласно методу АКАРК используя *энергетический инвариант*, т.е. введением макропеременную (аттрактор) в виде динамики колеблющегося маятника (6) и используя функциональное уравнение в виде (3), получаем



$$T_1 \dot{\psi}_1(t) + x_2^2 \psi_1 = 0 . \quad (9)$$

Структура соотношения (9) имеет ряд важных отличительных особенностей [10]:

1. Уравнение (9) обладает свойством асимптотической устойчивости относительно энергетического инвариантного многообразия  $\psi_1 = 0$  (6), что можно показать, введя функцию Ляпунова  $V = 0,5 \psi_1^2$ , производная которой по времени всегда отрицательна при  $\psi_1 \neq 0, x_1 \neq 0, x_2 \neq 0$ ,

$$\dot{V}_1(t) = \psi_1 \dot{\psi}_1(t) = -\frac{x_2^2}{T_1} \psi_1^2 < 0.$$

2. Факт асимптотической устойчивости синтезируемой системы относительно энергетического инварианта  $\psi_1 = 0$  (6) означает, что ИТ системы неизбежно выходит на  $\psi_1 = 0$ , на котором реализуется баланс кинетической и потенциальной энергии, т.е. возникают автоколебания, амплитуда которых определяется величиной энергии  $a$ .

Тогда в силу уравнений (6) и (9), получим закон обратной связи

$$u = -0,5 \frac{2T_1 \omega^2 x_1 + x_2^3 + x_2 \omega^2 x_1^2 - 2x_2 a}{T_1} . \quad (10)$$

Структура закона управления (10) не имеет точки сингулярности, что достигнуто благодаря выбранной энергетической макропеременной (ИМ) (6) и соответственно функционального уравнения в виде (3).

Результаты моделирования замкнутой системы управления объекта (5) с регулятором (10) при  $T_1=1, a = 5, \omega = 10$  представлены на рис.2– рис.3.

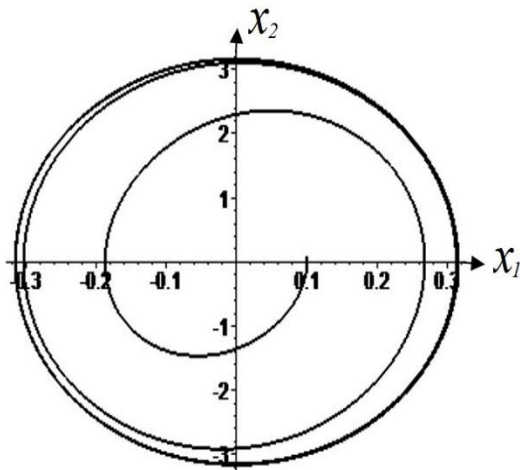


Рисунок 2 – Фазовый портрет замкнутой системы

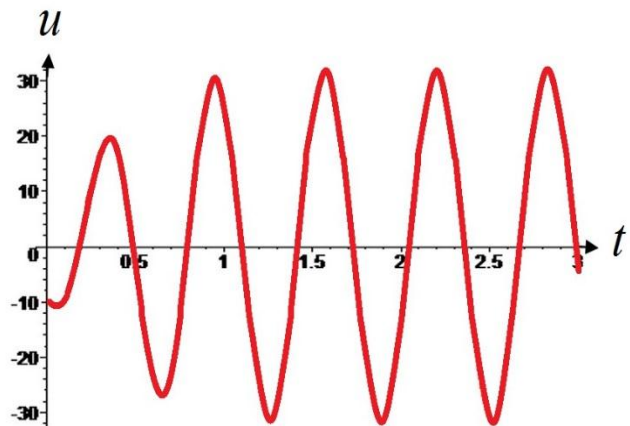


Рисунок 3 – Управляющее воздействие

Из графиков на рисунках 2 и 3 видно, что синтезированный закон управления (10) обеспечивает замкнутой системе (5), (10) асимптотическую устойчивость в целом по отношению к ее стационарному состоянию  $\psi_1 = 0$  (6), определяемому желаемой полной энергии  $a$  системы. На основе изложенного подхода можно строить законы

управления различными консервативными системами. Уравнение замкнутой системы (5), (9) принимает вид [8,9]:

$$\ddot{x}_1(t) - [a^2 - F(x_1) - 0,5x_1^2]x_1(t) + \frac{\partial F(x_1)}{\partial x_1} = 0. \quad (11)$$

В зависимости от выбранной потенциальной функции  $F(x_1)$  можно получить разные типы автоколебательных систем (11), которые имеют на многообразии  $\psi_1 = 0$  (6) соответствующие типы движения, например:

а) гармонические

$$F_c(x_1) = 0,5\omega^2 x_1^2; \quad (12)$$

б) по Дуффингу

$$F_D(x_1) = 0,5\omega^2 x_1^2 + \beta x_1^4; \quad (13)$$

в) по Тоду

$$F_T(x_1) = e^{x_1} + x_1; \quad (14)$$

г) солитонные

$$F_c(x_1) = ax_1^3 - \beta_1^2. \quad (15)$$

Подставив соответствующие потенциальные функции (12)–(15) в (11), можно получить: генератор гармонических колебаний, генератор Дуффинга, генератор Тода или генератор солитоноподобных колебаний и др. [8,9].

Таким образом, новый метод АКАРК СТУ позволяет путем аналитического синтеза соответствующих законов управления преобразовать нелинейный объект либо в генератор желаемых устойчивых нелинейных колебаний, либо в систему, подавляющую нежелательные внешние колебательные возмущения. Оба варианта имеют важное прикладное значение в задачах управления различными современными техническими объектами в радиотехнике, электромеханике, авиации и космонавтике, в различных технологических процессах разного применения и др.

**Заключение.** Законы управления модельного объекта синтезированы управления на основе метода АКАРК в программной среде Maple. Структура синтезированных законов управления объекта  $u(x_1, x_2)$  зависит от формы выбираемого ИМ и вида функционального уравнения. Преимуществом метода АКАРК является получение законов управления в аналитической форме.

*Литература*

- 1 Колесников А.А. Синергетическая теория управления // М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
- 2 Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. 2-е издание // М.: КомКнига. 2012. – 240 с.
- 3 Колесников А.А., Колесников Ал.А., Кузьменко А.А. Методы АКАР и АКОР в задачах синтеза нелинейных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17.– №10. – С. 657–669.
- 4 Шаршеналиев Ж., Бакасова А.Б. Управление систем с хаосодинамикой и самоорганизацией // Междунар. научная конференция посвящ. 80-летию проф. Рудаева Я.И. (2-3 декабря 2016г. в КРСУ им. Б.Н. Ельцина) Вестник КРСУ 2017.Т17 Вып.1. – С. 66–70.
- 5 Шаршеналиев Ж.Ш., Бакасова А.Б. Проблемы нелинейной динамики самоорганизующихся систем с векторным управлением // Известия НАН КР. – Бишкек, 2017. №2. – С. 7–19.
- 6 Бакасова А.Б. Синтез сложных систем с нелинейной динамикой и самоорганизацией // Бишкек: Изд-во «Инсанат», 2014. – 424с.
- 7 А.А. Кузьменко, Б.А. Бакасова, Г.Н. Ниязова Синергетический подход к нелинейному адаптивному управлению гидрогенератором энергосистемы // Проблемы автоматизации и управления. 2014. – №1 (26). – С. 13–19.
- 8 Колесников Ал.А. Управление нелинейными колебаниями. Энергетические инварианты // Известия РАН. Теория и системы управления. 2009. №2. – С. 24–37.
- 9 Колесников Ал.А. Синергетические методы синтеза систем управления колебательными процессами: энергетические инварианты // Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2012. – 117с.
- 10 Колесников Ал.А. Метод синергетического управления самоорганизующимися нелинейными колебательными системами // Известия ЮФУ. – Таганрог: Технические науки. 2015. – С. 231–240.
- 11 Шаршеналиев Ж.Ш., Бакасова А. Б. «Системный синтез динамических систем с нелинейными колебаниями» // Известия НАН КР – №1. – Бишкек: 2018. – С. 10–17.

*Айдарова А. Р., aidarova\_2010@mail.ru  
«Северэлектро» ААКМУ, Бишкек, Кыргызстан*

## **МОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ОТ КОРОНЫ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГОРЬЯ**

Рассмотрено модельное представление потерь от короны в высоковольтных воздушных линиях электропередачи в условиях высокогорья. На основе обзора научных публикаций, посвященных анализу потерь от короны в воздушных линиях, отмечено, что значения обобщенных для различных сечений проводов потерь мощности на корону не совпадают с результатами расчетов по методике для высокогорных ЛЭП. Отсюда следует, что требуются дополнительные исследования по уточнению дополнительных факторов, влияющих на потери от короны. Приводятся авторские представления о таких дополнительных факторах.

**Ключевые слова:** потери от короны, воздушные линии электропередачи в условиях высокогорья, напряженность электрического поля, погодные условия, снежный покров, диэлектрическая проницаемость.

**Постановка задачи.** Интерес к изучению короны связан с потерями энергии при коронировании ЛЭП и с тем, что она является источником акустического шума и высокочастотного электромагнитного излучения (спектр частот 0,154–100 МГц), которые создают помехи радио- и телеприему. Так, потери энергии при коронировании проводов ЛЭП сверхвысокого напряжения в плохую погоду составляют очень большую величину [1].

При коронном разряде у поверхности провода образуется объемный заряд, знак которого совпадает с полярностью напряжения на проводе. Силы электрического поля способствуют перемещению ионов, составляющих объемный заряд от провода. Для их перемещения необходимы затраты энергии, которые и определяют в основном потери энергии на корону, поскольку затраты энергии на ионизацию воздуха значительно меньше.

Уровень рабочего напряжения сети, сечения проводов и конструкция фазы, *но, в еще большей степени, погодные условия, влияют на потери мощности от короны на проводах ВЛ.* Потери на корону при тумане и изморози возрастают в десятки раз по сравнению с потерями при хорошей погоде [2].

В работе [1] дан анализ проблем расчёта потерь на корону воздушных линий электропередачи, согласно которым:

– методика [3,4], основанная на усреднении данных измерений зависимости потерь на корону от напряжения на опытных пролётах в произвольно принятых координатах, до сих пор используется при расчёте потерь мощности и электроэнергии на корону;

– анализ показал, что при использовании методики [5] получаем значения значительно ниже реальных удельных потерь мощности на корону, так для годовых потерь электроэнергии на корону, рассчитанные в [3];

– потери, измеренные при хорошей метеоусловиях и осадках [6] на 30% превышают значения, полученные в [5];

– результат эксплуатации ВЛ 1150 кВ Экибастуз – Кокчетав показал, что

потери на корону в этой ВЛ на номинальном напряжении, определённые по методике [7], оценены неверно;

– по американским источникам, например, в справочнике [8] на стр.205, потери не могут быть определены, исходя из кратковременных испытаний на коротких линиях, так как для этого требуется проведение многочисленных статистических измерений. Поэтому, данные измерений потерь на опытных пролётах не репрезентативны и следовательно не позволяют получить достоверные значения потерь;

– результаты обобщений экспериментальных данных, полученных на исследуемых участках, противоречат теоретическим работам, проводившимся со времён Р. Хольма (1927г.) и подтверждённым исследованиями ЭНИН [7], потери мощности общей короны при переменном токе равны  $P_k = bU(U - U_0)$ , где  $b$  – коэффициент, зависящий от конфигурации ВЛ и формы объёмного заряда,  $U$  – амплитудное значение фазного напряжения ВЛ,  $U_0$  – критическое напряжение общей короны. Следовательно, обобщение потерь мощности на корону необходимо производить в безразмерных координатах  $\frac{P_k}{bU^2} = f\left(\frac{U_0}{U}\right)$ .

Результаты проведенных на станции Тюз-Ашу (КР) на высоте 3050 м над уровнем моря [9] испытаний показали несовпадение обобщенных для различных сечений проводов потерь мощности на корону с результатами расчетов по методике для высокогорных ЛЭП.

Таким образом, возникает необходимость проведения в условиях высокогорных ЛЭП [10] исследований для уточнения влияющих факторов и разработки методики расчета потерь мощности и энергии на корону.

Анализ научных публикаций, посвященных оценке влияний погодных условий на ПК, показал, что они в основном связаны с возникшими на поверхности проводов неровностями из-за атмосферных отложений (капли дождя, роса, снег, изморозь, гололед, иней).

**Анализ дополнительных причин.** По нашему мнению, кроме погодных условий на ПК влияют еще и другие факторы. С целью обоснования возможных дополнительных причин потерь на корону ознакомимся с некоторыми положениями электрофизических основ коронного разряда на проводах воздушных линий электропередачи и с основными расчетными формулами [5, 11].

Главным фактором, от которого зависят потери на корону и радиопомехи на ВЛ, является отношение напряженности электрического поля на поверхности проводов к начальной напряженности короны.

Незначительные изменения этого отношения приводят к существенному изменению потерь на корону и радиопомехи. Из-за этого напряженность поля вычисляют с погрешностью не более 1%.

Для ВЛ с одиночными проводами напряженность  $E$  электрического поля на поверхности провода, согласно [5], определяется по формуле

$$E = \frac{q \cdot 10^{-3}}{2\pi\epsilon_0 r_0} \text{ кВ/см (} 10^5 \text{ В/м)}, \quad (1)$$

где  $q$  – линейная плотность заряда на проводе, К/м;  $r_0$  – радиус одиночного провода, см ( $10^{-2}$  м);  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость воздуха:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \text{ Ф/м.}$$

В то же время, согласно теории электромагнитного поля [12], выражение, определяющее напряженность  $E$  электрического поля на поверхности провода, выглядит так

$$E = \frac{q \cdot 10^{-3}}{2\pi\epsilon_a r_0} \text{ кВ/см (} 10^5 \text{ В/м)}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вещества, для нашего случая (воздуха), она определяется из выражения

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r, \quad (3)$$

где  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха.

Следует отметить, что формула (1), которая используется в руководящем указании по учету потерь на корону, вызывает недоумение, т.к. величина  $\epsilon_0$ , являющаяся параметром вакуума, названа диэлектрической проницаемостью воздуха. Последствия влияния этой «неточности» на оценку величины потерь от корону рассмотрим далее, после краткой информации о процессах, вызывающих потери энергии при короне на переменном напряжении.

Подводя итог той информации, которую мы рассмотрели выше и которая отражает основные положения электрофизических основ коронного разряда и основные расчетные формулы, можем сделать следующие заключения:

– в рассмотренном расчетном аналитическом выражении (1), с помощью которого оцениваются ПК, имеются некоторые противоречия насчет трактовки величины  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ , характеризующей электрические свойства вакуума [12], однако во многих работах эту величину, которая по своей природе является константой, назвали диэлектрической проницаемостью воздуха, которая в общем случае зависит от климатических условий;

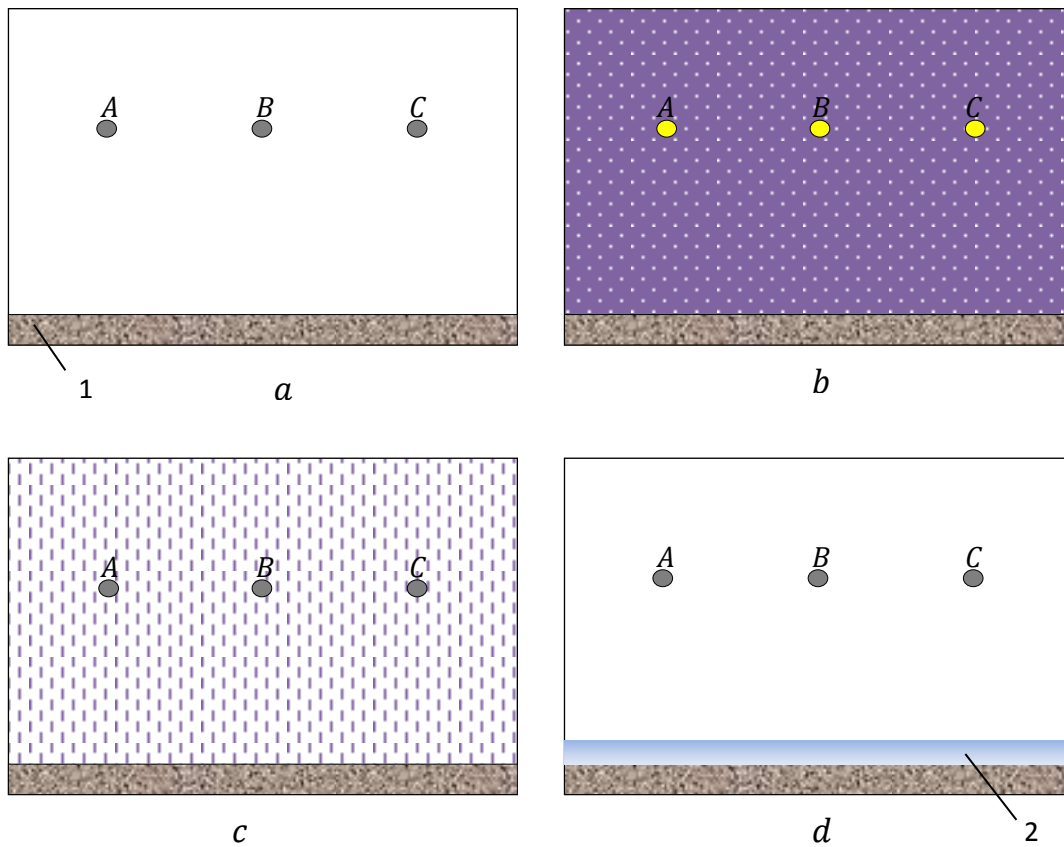


Рисунок 1 – Схематичные изображения метеорологической обстановки в месте прохождения ВЛ: *a* – ясная погода; *b* – снегопад; *c* – дождь, повышенная влажность воздуха, туман; *d* – после снегопада; *A, B, C* – провода ВЛ; 1 – земля; 2 – снежный покров

– при строгом подходе, выше отмеченные неточности устраняются, если в выражении (1) вместо  $\varepsilon_0$ , как требует теория электромагнитного поля, подставлять,  $\varepsilon_a = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$  [12], где  $\varepsilon_a$  и  $\varepsilon_r$  соответственно абсолютная и относительная диэлектрические проницаемости вещества, в нашем случае воздуха. Т.к. для газа  $\varepsilon_r \approx 1$ , то для воздуха в нормальных погодных условиях можно считать,  $\varepsilon_a \approx \varepsilon_0$ ;

– применение формулы(1) правомерно при нормальных погодных условиях и высокогорья (рис.1, а), т.е., когда диэлектрическую проницаемость воздуха можно считать приблизительно равной  $\varepsilon_0$ ;

– во время дождя или снегопада, особенно при ливневых дождях, снежной метели или густом тумане с повышенной влажностью воздуха пространство между землей и проводами воздушной линии электропередачи можно считать заполненным композиционным диэлектриком (КД). КД представляет в одном - случае смесь воздуха и капелек воды во время дождя или тумана, а в другом смесь воздуха и снежинок. В этом случае  $\varepsilon_r > 1$ , и его значение можно оценить по различным формулам в зависимости от структуры КД.

При *взаимопроницающей структуре*, например, при густом тумане, относительную диэлектрическую проницаемость КД можно рассчитать по формуле Лихтенеккера [13]:

$$lg\varepsilon_{rcm} = y_1 lg\varepsilon_{r1} + y_2 lg\varepsilon_{r2}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{r1}$ ,  $\varepsilon_{r2}$  – относительные диэлектрические проницаемости компонентов (для воды  $\varepsilon_r = 81$ , сухого воздуха  $\varepsilon_r \approx 1$ ),  $y_1$ ,  $y_2$  – объемные содержания компонентов, значения которых зависят от интенсивности осадков и оцениваются путем экспериментального измерения.

Широко используемая формула (4) – полуэмпирическая, её теоретическое обоснование дано в работе [14].

При *матричной структуре* по формуле Нильсена [15]: в случае снегопада наполнитель – снежинка с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{ch}$ , а матрица – воздух с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_b$  формулу Нильсена можно написать в виде:

$$\varepsilon = \varepsilon_b \cdot \frac{1 + A \cdot B \cdot V_b}{1 - B \cdot \Psi \cdot V_b}, \quad (5)$$

$B = \frac{\varepsilon_{ch}/\varepsilon_b - 1}{\varepsilon_{ch}/\varepsilon_b + A}$ ,  $\Psi = 1 + \frac{1-p_m}{p_m} \cdot V_k$ , где  $V_{ch}$  – объемная доля снежинки,  $A$  – характеристика формы частиц, для сфер  $A = 1.5$ , для частичек нерегулярной формы с минимальной поверхностью  $A = 3$ , для пластинок и чешуек различной формы  $A = 4$ ;  $p_m$  – максимально возможная объемная доля твердой фазы, характеризующая укладку и форму частиц. Аналогично можно написать эту формулу и для дождя.

При метеорологической обстановке, изображенной на рис.1, d, т.е. в зимний период, после каждого снегопада на поверхности земли, особенно в высокогорьях, постепенно накапливается снежный покров достаточной толщины.

В этом случае происходит изменение напряженности электрического поля в сторону повышения, в области между проводами ВЛ и поверхностью земли, что может привести к увеличению потери на корону. Для обоснования этого утверждения рассмотрим задачу расчета напряженности электрического поля над поверхностью снежного покрова (рис. 2).

Предположим, что эквипотенциальная поверхность 1 приближенно представляет собой плоскость, параллельную поверхности земли;  $h_1$  – расстояние от поверхности снежного покрова до эквипотенциальной поверхности 1;  $h_2$  – толщина снежного покрова;  $\varepsilon_{a1}$ ,  $\varepsilon_{a2}$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость соответ-

ственно воздуха и снега. Сухой снежный покров является диэлектриком, *проницаемость*  $\epsilon$  которого зависит от частоты электромагнитных волн, их длины и от состояния снега (температуры, плотности, структуры, влажности). Диэлектрическая проницаемость снега значительно меньше, чем льда ( $\epsilon_{\text{ол}} = 73 \dots 95$ ,  $\epsilon_{\infty\text{ол}} = 3 \dots 8$ ), и увеличивается с возрастанием его плотности и влажности [16].

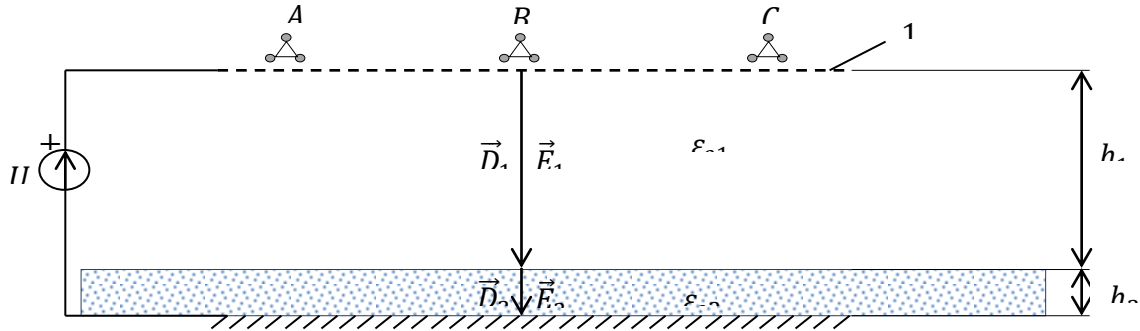


Рисунок .2 – Приближенная эквивалентная схема замещения промежутка между проводами ВЛ и поверхностью земли:  $A, B, C$  – высоковольтные провода ВЛ;  $h_2$  – толщина снежного покрова;  $h_1$  – расстояние от поверхности снежного покрова до эквипотенциальной поверхности 1;  $\epsilon_{a1}$ ,  $\epsilon_{a2}$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость соответственно воздуха и снега

Искажающего влияния коронирующих проводов ВЛ на поле не будет. При этом условии в каждом слое поле будет равномерным. В силу того, что нормальная составляющая вектора  $\vec{D}$  непрерывна, имеем  $D_{1n} = D_{2n}$  [12].

Но  $D_{1n} = \epsilon_{a1}E_1; D_{2n} = \epsilon_{a2}E_2$ . Следовательно,

$$\epsilon_{a1}E_1 = \epsilon_{a2}E_2. \tag{6}$$

Из этого выражения следует, что отношение напряженностей обратно пропорционально отношению электрических проницаемостей.

В уравнении (6) остаются неизвестными величины  $E_1$  и  $E_2$ , для определения этих величин составим уравнение, исходя из того, что

$$\int_0^{h_1} \vec{E}_1 d\vec{x} + \int_{h_1}^{h_1+h_2} \vec{E}_2 d\vec{x} = U$$

или

$$E_1 h_1 + E_2 h_2 = U. \tag{7}$$

Совместное решение (6) и (7) дает

$$E_1 = \epsilon_{a2} \frac{U}{\epsilon_{a2}h_1 + \epsilon_{a1}h_2}, \quad E_2 = \epsilon_{a1} \frac{U}{\epsilon_{a2}h_1 + \epsilon_{a1}h_2}.$$

Учитывая (3), получим



$$E_1 = \varepsilon_{r2} \frac{U}{\varepsilon_{r2}h_1 + \varepsilon_{r1}h_2}, \quad E_2 = \varepsilon_{r1} \frac{U}{\varepsilon_{r2}h_1 + \varepsilon_{r1}h_2}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_{r1} \approx 1$  - относительная диэлектрическая проницаемость сухого воздуха;  $\varepsilon_{r2} \approx 10$  - относительная диэлектрическая проницаемость сухого снега. Сопоставление результатов расчета по формулам (8) показывает, что при наличии снежного покрова  $E_1 > E_2$ , т.е. напряженность электрического поля в воздухе увеличивается по сравнению с ситуацией отсутствия снежного покрова, и степень увеличения зависит от толщины покрова и значения относительной диэлектрической проницаемости снега  $\varepsilon_{r2}$ . Как было отмечено выше,  $\varepsilon_{r2}$  увеличивается с возрастанием его плотности и влажности снега [16].

Другим дополнительным фактором, который может повлиять на ПК, является физический процесс, рассмотренный в [16].

Во время низовых метелей крупные кристаллы льда мелкая снежная пыль имеют различные заряды (первые – отрицательные, вторые – положительные). Свежевыпавший снег и слежавшийся наэлектризованы по-разному: первый чаще всего наэлектризован больше. В проводах ЛЭП может накопиться объемный заряд, который приведет к коронному разряду в результате образования электрического поля во время снежных метелей.

**В заключение отметим**, что анализ научных публикаций, посвященных оценке влияния погодных условий на ПК, показал, что они в основном связаны с возникшими неровностями на поверхности проводов из-за атмосферных отложений (капли дождя, роса, снег, изморозь, гололед, иней). Но есть, по нашему мнению и другие причины. Например: во время атмосферных осадков или метеоусловий с повышенной влажностью воздуха, пространство между землей и проводами воздушной линии электропередачи заполнено композиционным диэлектриком: в одном случае смесь воздуха и капелек воды, а в другом – смесь воздуха и снежинок. В этом случае  $\varepsilon_r > 1$ , следовательно, потери на корону увеличиваются; - в зимний период после каждого снегопада на поверхности земли, особенно в высокогорье, постепенно накапливается снежный покров достаточной толщины. В этом случае происходит изменение напряженности электрического поля в сторону повышения в области между проводами ВЛ и поверхностью земли, что может привести к увеличению потери на корону.

### *Литература*

1. Тамазов А.И. О проблемах расчёта потерь на корону воздушных линий электропередачи  
//<http://portalenergetika.com/articles/oproblemahraschetapoternakoronuvozdushnyihliniyelektropredachi>.
2. Беляева Л.А., Булатов Б. Г. Оценка потерь электроэнергии на корону по данным телеметрии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2007. – № 20(92). – С. 43–45.
3. Костюшко В.А. Анализ расчетных и экспериментальных оценок потерь мощности на корону на воздушных линиях электропередачи переменного тока. -М.: НТФ

- «Энергопрогресс», 2011. – 84 с.: ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик», Вып. 6 (150)].
4. Савкова Т. Н., Кравченко А. И. Измерение энергии тепловых потерь мощного светодиодного модуля // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого — 2013-№3.
  5. Руководящие указания по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330-750 кВ и постоянного тока 800-1500 кВ.
  6. Емельянов Н.П., Костюшко В.А. Результаты измерений потерь мощности на корону на опытной ВЛ 1150 кВ. / В сб. «Перенапряжения, конструкции и радиопомехи в электропередачах 1150 кВ». – М.: Энергоатомиздат, 1984.
  7. Тамазов А.И. Корона на проводах воздушных линий переменного тока. Спутник +. М., 2002. (67)
  8. Линии «электропередачи 345 кВ и выше. / Перевод под ред. В.В. Бургсдорфа. – М.: Энергия, 1980.
  9. Дикамбаев Ш.Б., Костюшко В.А., Ордоков И.О., Емельянов Н.П. Исследование потерь мощности на корону на высокогорных линиях электропередачи переменного тока // Сб. “Исследования и испытания в электропередачах 750-1150 кВ”. – М.: Энергоатомиздат, 1991. - С. 131-141.
  10. Егиазарян Л.В., Сафарян В.С., Караханян Л.О, Арутюнян А.С. К вопросу уточнения расчета потерь мощности на корону в высокогорных воздушных линиях электропередачи // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2010. Т. LXIII - С. 63-69.
  11. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учеб. для вузов / И.М. Бортник и др.; под общ. ред. И.П. Верещагина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 704 с.: с ил. (57)
  12. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник / Л.А. Бессонов. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 263 с.: ил.
  13. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоиздат, 1982. (68)
  14. Сатаркулов К.А., Воробьев А.С. К вопросу обоснования формулы Лихтенеккера. - М.: Моск.энерг.ин-т. 1980. - 15 с. Рукопись депонирована в ВИНТИ.
  15. Наполнители для полимерных композиционных материалов: Справочное пособие; Пер. с англ./ Под ред. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1981. – 736 с., ил.
  16. Мосин О.В. Характеристика снежного покрова / <http://coolreferat.com/375920>.

*Н.Т. Ниязов* КГТУ им. И.Раззакова [niiazov54@mail.ru](mailto:niiazov54@mail.ru)

*Г.Н.Ниязова* Институт машиноведения и автоматизации НАН КР  
[gulmira-n.86@mail.ru](mailto:gulmira-n.86@mail.ru)

## **КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭНЕРГООБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ: СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ**

В статье приведен анализ современного состояния и выявлены проблемы контроля и диагностики сложных электроэнергетических систем и энергообъектов. Рассмотрены характерные особенности сложных энергообъектов, находящихся в нештатных режимах с точки зрения диагностики их состояния.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, энергообъект, нештатный режим, диагностика, контроль технического состояния

**Введение.** Системные исследования проблемы эффективного контроля и диагностики состояния сложного электротехнического оборудования и энергообъектов (ЭО) являются на современном уровне развития техники, чрезвычайно актуальными.

В настоящее время жизнь и развитие цивилизованного общества непосредственно зависит от устойчивого функционирования современных сложных электро-энергетических систем (ЭЭС). Последние в целом – открытые, большие, нелинейные, многомерные и многосвязные, представляют собой комплексы различных подсистем, связанных между собой процессами тесного динамического взаимодействия и интенсивного обмена информацией, веществом и энергией [1]. Важной особенностью ЭЭС является одновременность процессов производства, преобразования, передачи, распределения и потребления электрической энергии, многообразия режимов, быстрота протекания переходных процессов, а также функционирования в условиях воздействия внешних и внутренних возмущений, так что при определенных условиях в ЭЭС возникают критические и хаотические режимы [2,3].

Значительный рост мощности, усложнение структуры энергосистем, сложность вновь создаваемого оборудования и при этом наличия большого парка физически и морально устаревшего оборудования, эксплуатация его в условиях напряженного режима функционирования выдвигают новые, более качественные, требования к методам контроля и диагностики перспективным. Современные методы контроля и диагностики должны быть созданы на основе результатов постижения глубинной алгоритмической структурной организации ЭЭС как открытой системы, проникновения в природу сложных процессов износа и старения, объяснения формы и изменчивости состояний, выявления спектра качественно различных типов поведения [4].

Важность решения указанных проблем подтверждается участвовавшими случаями технических аварий с катастрофическими последствиями для самого ЭО ЭЭС, окружающей среды и обслуживающего персонала [5]. Причинами большинства случаев являются элементарная, плохо или вообще непригодность

эксплуатируемого устаревшего и вновь создаваемого оборудования к диагностическому контролю, отсутствие средств контроля технического состояния [6].

В структуре современных ЭЭС значительное место занимают агрегаты электрических станций, выполняющие функцию непосредственной генерации электроэнергии, в состав которых входят турбина и СГ, к важнейшим динамическим свойствам которых относятся: динамичность, нелинейность, многомерность, многосвязность, наличие взаимодействующих подсистем [3].

Генераторы, как объект контроля, требуют особого внимания. Разнообразие воздействующих на них нагрузок – механических, тепловых и электрических (особенно для машин предельных мощностей), требуют всестороннего «наблюдения» с помощью различного рода датчиков, а также специальных программ обследования [7].

Современная ситуация в электроэнергетике Кыргызской Республики (КР) требует повышенного внимания к контролю состояния и определению текущей работоспособности ЭО электростанций и сетей. Большинство гидроагрегатов в Кыргызстане, выпущенные заводами бывшего СССР и введенные в 50-70-х гг. двадцатого столетия, проработали более 30 лет, так что изношенность основных ресурсов электроэнергетики КР составляет примерно 70%.

Вероятность появления дефектов и неисправностей у такого оборудования достаточно большая. Темпы старения ЭО гидроэлектростанций (ГЭС) зарубежных стран примерно одинаковы. В большинстве стран СНГ, в том числе и в КР, имеются планы модернизации действующих ГЭС (реконструкции Токтогульской, Уч-Курганской, Ат-Башинской ГЭС), что потребовало развития соответствующих программ обследования состояния оборудования, методов и средств контроля и диагностики состояния.

В настоящее время ремонтное диагностирование является практически единственным средством выявления дефектов генерирующего оборудования в отечественной электроэнергетике. Это определило сложившуюся структуру ремонтно-технического обслуживания с четкой регламентацией сроков и видов плановых ремонтов.

Как известно, контроль состояния гидроагрегатов традиционно производят в основном визуально, (осмотры, ревизии оборудования через определенный промежуток времени) или с помощью автоматизированных систем мониторинга, осуществляющими сбор необходимых параметров режима работы [8].

Увеличение объема информации о состоянии узлов генератора, получаемой от датчиков, требование к быстрому анализу этой информации и решение сложной постановки диагноза привели к широкому внедрению автоматизированных систем контроля и диагностики.

Одним из важнейших аспектов внедрения автоматизированных систем контроля и диагностики является социальный. Применение «интеллектуальных» экспертных систем облегчает труд эксплуатационного персонала, повышает эффективность управления режимом и достоверность оценки состояния генератора, устраняет многие ошибки персонала..

В работе [6] предложена экспертная система контроля состояния вертикальных гидрогенераторов (постановки диагноза с базами знаний) в виде пакета прикладной

программы «Автоматизированная система обработки Базы данных каскада Токтогульских ГЭС», разработанной на базе «Microsoft Access» с целью автоматизации ведения эксплуатационных журналов гидроагрегатов ГЭС; оперативной обработки введенной информации, а также создания архива «истории жизни» гидрогенераторов [9].

При разработке экспертной системы в качестве базовой были приняты структурные элементы экспертной системы (рис.1) [10].

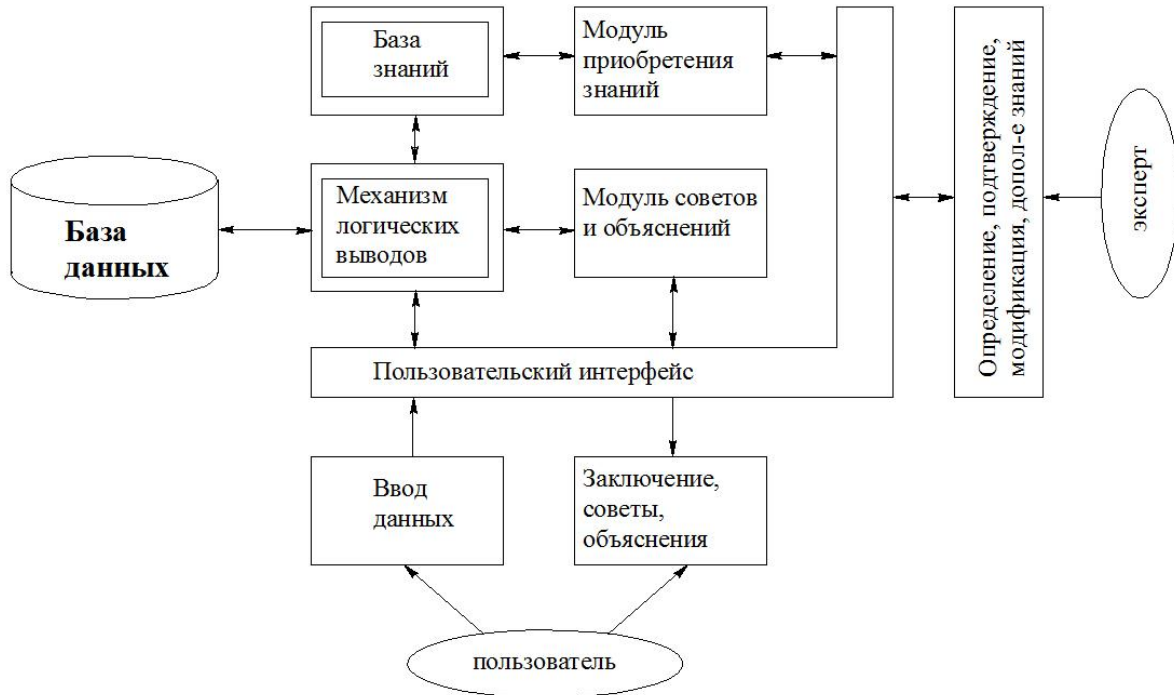


Рисунок 1 – Структурные элементы экспертной системы

На основе анализа зарубежного и Российского опыта проектирования прикладных экспертных систем (ЭС) для задач диагностики оборудования электростанций предложена следующая концепция построения автоматизированной экспертной системы для оценки эксплуатационного состояния энергообъекта (АЭСЭС) (рис.2). Изложенная концепция построения АЭСЭС положена нами в основу разработки экспертной системы на примере контроля состояния гидроагрегата Токтогульской ГЭС и составления семантической схемы отношений концептов элементов гидрогенератора [6].

Практика эксплуатации различных ЭО показывает, что при отсутствии специальных средств поддержки функционирования и контроля основная часть времени восстановления затрачивается на поиск и локализацию отказов, увеличивая тем самым затраты на ремонт и обслуживание. С другой стороны, используемые традиционные методы и средства функционального контроля и диагностики ЭО не всегда удовлетворяют современным требованиям к надежности и обеспечению безопасности эксплуатации критического оборудования. Поэтому на современном этапе автоматизация процедур технического диагностирования является важнейшим средством повышения качества технического обслуживания и эксплуатации ЭО ЭЭС.

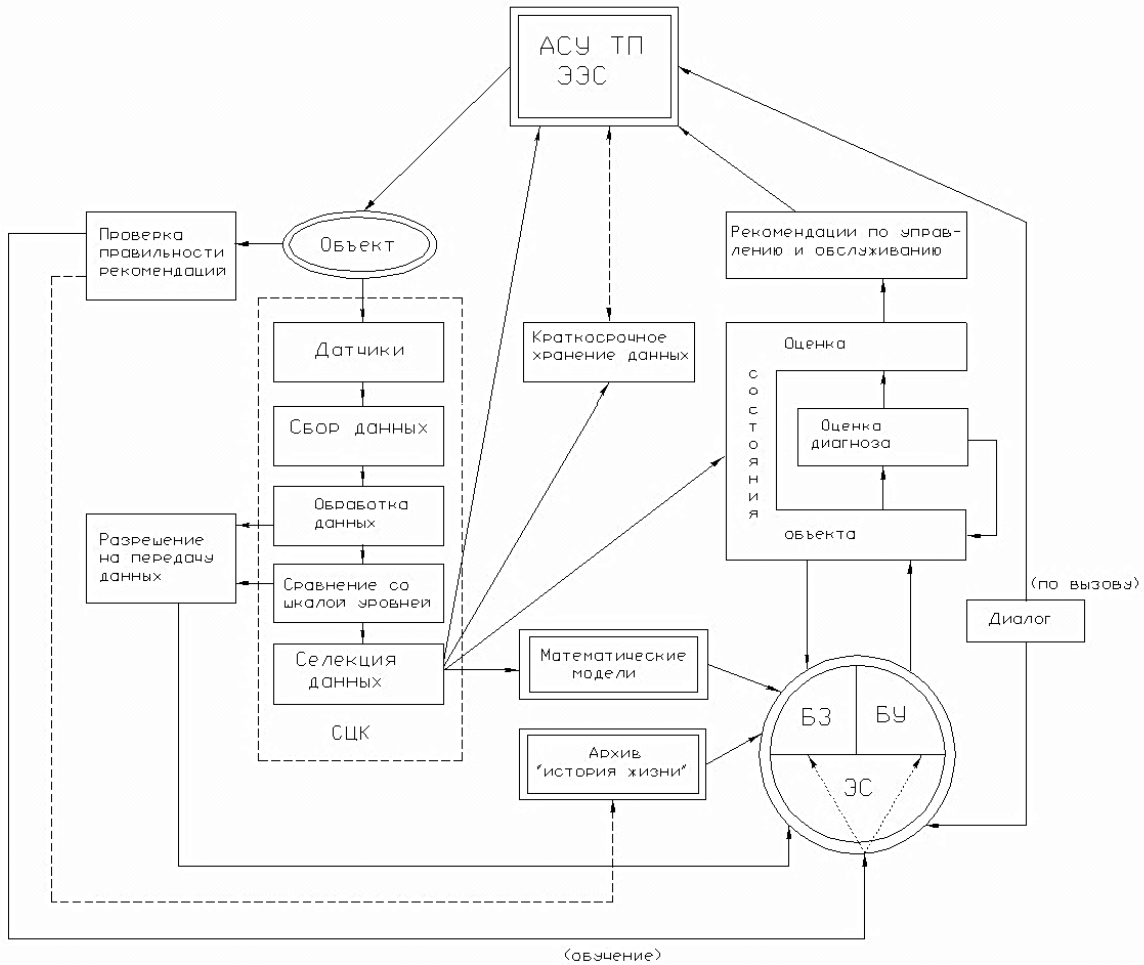


Рисунок 2 – Структурная схема автоматизированной экспертной системы оценки эксплуатационного состояния энергообъекта (ЭС – экспертная система, СЦК – система централизованного контроля, БЗ – база знаний, БУ – база умений)

В настоящее время приоритетными являются вопросы разработки эффективных и надежных средств и методов контроля технического состояния в процессе эксплуатации ЭО без разборочно-сборочных работ, нарушающих приработку узлов и сокращающих срок службы электрических машин и механизмов [4]. Основное назначение подобных средств непрерывного и периодического контроля состоит в сокращении времени на поиск неисправностей (или потенциально неисправных) элементов, в своевременном прогнозировании ухудшения состояния оборудования и предотвращении аварийных ситуаций. С точки зрения проблемы диагностики все технические системы можно подразделить на два класса [4]:

1. Объекты и системы, описываемые, как правило, линейными моделями, функционирующие в установившихся, стационарных режимах и характеризующиеся предсказуемым поведением. Для оценки работоспособности таких систем разработано множество методов и подходов [11–15].
2. Объекты и системы, функционирующие в напряженных, нештатных режимах и описываемые, как правило, нелинейными уравнениями, их состояние заметно

зависит от вида конечных флуктуаций и возмущений, действующих на систему [16].

Для технических систем именно в нештатных режимах решение вопросов диагностики к настоящему времени остается во многом открытым и малоизученными, и поэтому имеет особую значимость [4].

Пользуясь терминологией теории синергетики [17], можно отметить, что ЭО в нештатных режимах можно рассматривать как системы, состояние которых относится к области сильного неравновесия, характеризуемой тем, что потоки вещества, энергии и информации являются сложными функциями сил (флуктуаций, возмущений, управляющих воздействий на систему со стороны внешней среды).

Важный вывод синергетики состоит в том, что в открытых системах, обладающих свойством однонаправленности во времени на макро и микроскопических уровнях, механизмом, который вызывает неравновесные состояния, является необратимость протекания процессов [18]. В реальных технических системах, помимо обратимых процессов - обменов энергией, веществом и информацией, протекают также и необратимые процессы из-за тепловых потерь, трения, старения и износа деталей и узлов системы, т.е. происходит процесс производства энтропии внутри самих систем [19].

Полное приращение энтропии в системе можно представить в виде суммы двух составляющих, имеющих разный физический смысл [20]:

$$dS = d_e S + d_i S, \quad (1)$$

где  $d_e S$  – отражает процесс обмена энергией системы с внешним миром и в принципе обратима, что соответствует закону сохранения энергии;

$d_i S > 0$  – всегда положительна и характеризует необратимые процессы, протекающие внутри системы (свидетельствует о производстве энтропии, причем поток энтропии протекает только в одном направлении), при  $d_i S = 0$  в системе отсутствуют необратимые процессы.

Энтропия системы (1) может оставаться постоянной, что для ЭО означает период нормального функционирования, при котором он устойчив, управляем и его состояния предсказуемы. При возрастании энтропия  $d_i S > 0$  характеризует самопроизвольную эволюцию системы. В природных системах  $d_i S > 0$  свидетельствует не столько о необратимых изменениях, о неуклонном развитии и стремлении к более высокому уровню упорядоченности, однако для технических систем это может означать только деградацию – постепенное старение (износ) или мгновенное разрушение [4].

Состояние ЭО характеризуется значениями его выходных контролируемых параметров, для которых, как правило, известны номинальные и критические значения. Отклонения, дрейф параметров от их номинальных значений, связывают с постепенным старением ЭО. При достижении критического значения в количественной эволюции системы происходит качественный скачок – точка разветвления эволюционной линии, которая получила название бифуркации [17, 21]. Бифуркация – это одномоментное состояние, когда система, потеряв устойчивость, полностью теряет память и управляемость, и ее последующее состояние оказывается принципиально непредсказуемым, поскольку определяется только теми случайными факторами,

которые в момент бифуркации действуют на систему. Иными словами, целью диагностики ЭО в нештатных режимах является определение деградирующих узлов или подсистем до момента бифуркации, приводящего к возникновению неработоспособности [4].

Системные исследования сложных ЭО как открытых динамических систем позволяют выявлять на глубинном уровне их особенности. Рассмотрение вопросов диагностики сложных ЭО, находящихся в нештатных режимах, представляется наиболее важным для обеспечения эффективности и безопасности их функционирования. Для сложной ЭЭС и ЭО в нештатном режиме, с точки зрения диагностики их состояния, можно отметить следующие характерные особенности [4]:

1. Современные многофункциональные и иерархически по своей структуре ЭЭС и ОЭ имеют, как правило, большое количество подсистем, блоков и элементов (состояние каждого из которых отображается выходным контролируемым параметром), отображаемых случайными процессами с выбросами значений за пределы допусковых зон. Это приводит к тому, что для обеспечения заданной полноты контроля объекта требуется непрерывный мониторинг множества параметров.
2. Исследование характеристик сложных ЭЭС и ЭО в различных режимах (нормальный, утяжеленный, аварийный и послеаварийный) выявляет наличие множественной корреляции определяющих параметров подсистем, блоков, элементов, при этом значимость параметров для диагностики может быть различной.
3. Эксплуатация современных ЭО ЭЭС в напряженном режиме его функционирования обуславливает возникновение нештатных ситуаций, характеризующихся малоинерционностью состояний ЭО, т.е. ЭО имеет тенденцию к быстрой смене своего состояния в зависимости от внешних возмущений (сброс или наброс мощности, короткие замыкания, лавина частоты и напряжения, перетоки мощности на межсистемных связях ЭЭС, параметрические возмущения, самораскачивание, самовозбуждение), случайных (изменение окружающей среды, помехи) или целенаправленных воздействий (управление) и происходящих внутренних процессов (приработки узлов, старения, износа деталей и т.д.). Малоинерционность ЭО приводит к тому, что на вход системы диагностики поступает критически малое количество информации, на основании которой необходимо принимать адекватные решения по управлению в реальном масштабе времени.
4. Для сложных ЭО в нештатных режимах размыкание обратных связей или подача тестовых воздействий, приводящих к неправильному функционированию, недопустимы, в связи с чем необходимо обеспечение непрерывности контроля и диагностики, оперативности получения информации о функционировании ЭО без разборочно-сборочных работ.
5. Деградиционные изменения ЭО, нарушающие регулярность его рабочих процессов, а также случайные воздействия внешней среды неизбежно приводят к нестационарности колебательных процессов, характерной особенностью которых является большое время корреляции, превосходящее время ресурса того или иного элемента или ЭО в целом. Процесс изменения параметров содержит медленную составляющую (дрейф) и скачкообразные отклонения (выбросы параметров за пределы допусковых зон). Дрейф параметров обусловлен старением элементов или



ЭО в целом и характеризует скорость нарастания повреждений. Быстрые скачкообразные изменения параметров вызываются различного рода поломками, обрывами, замыканиями и т.п., которые, в свою очередь, обусловлены конструктивными и технологическими дефектами ЭО. Дрейф параметров способствует возникновению скачков параметров (например, накопление усталостных деформаций в конструкции уменьшает пределы ее прочности). Таким образом информация о выбросах значений контролируемых параметров за пределы допусковых зон может быть использована в качестве эмпирических данных для диагностики ЭО.

6. Исследование ЭО как объекта наблюдения производится при существенной неопределенности, обусловленной недостатком априорной информации, отсутствием или неполнотой знаний о структуре ЭО, происходящих в нем процессах, а также наличием большого количества неконтролируемых, трудно учитываемых или неизвестных факторов внешней среды.
7. Сложность, многоцелевой характер функционирования ЭО требуют много-модельного статистического подхода к оценке состояния и основных характеристик работоспособности, а также обеспечения адаптивности системы диагностики к фактическому состоянию ЭО.

**Заключение.** Диагностика сложных ЭО в нештатных режимах предполагает необходимость учета *малоинерционности*, наличия большого количества *взаимокоррелированных* контролируемых параметров различной диагностической значимости, *иерархичности* структуры, *многорежимность*, значительной *неопределенности* поведения ЭО и *эмпирических измерений случайных процессов* с выбросами значений контролируемых параметров за пределы допусковых зон, а также учета *случайного* характера воздействий на него со стороны *внешней среды*.

### *Литература*

- 1 Бакасова А.Б., Ниязов Н.Т., Ниязова Г.Н. Проблемы эффективного управления современными и перспективными электроэнергетическими системами // Проблемы автоматизации и управления. – Бишкек, 2010. – №2. – С. 132 – 135.
- 2 Бакасова А.Б., Ниязов Н.Т. О синергетическом подходе в управлении частотой и напряжением сложной электроэнергетической системы // Изв. Кырг. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 29. – С. 42–46.
- 3 Бакасова А.Б. Синтез сложных систем с нелинейной динамикой и самоорганизацией // – Бишкек: Изд-во «Инсанат», 2014. – 424с.
- 4 Гузик В.Ф., Кидалов В.И., Самойленко А.П. Статистическая диагностика неравновесных объектов // – СПб: Судостроение, 2009. – 304 с., ил.
- 5 Смолоник, С.В. Роль «человеческого фактора» в развитии крупных системных аварий // ELEKTROENERGETIKA. – 2008. – Vol.1, №1. – Р.16-19.
- 6 Ниязов Н.Т. Разработка экспертной системы контроля состояния вертикальных гидрогенераторов // канд. диссерт. – Бишкек, 2006. – 184с.
- 7 Александров А.Е., Гушин Е.В., Элькинд Ю.М. О системе технологического контроля мощных гидрогенераторов // Электрические станции. – 1981. – №6.

- 8 Алексеев Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов // – М.: Изд-во НЦ «ЭНАС», – 1998. – 144 с.
- 9 Апышев Д.А., Ниязов Н.Т., Сатаркулов К.А. Автоматизированная система обработки базы данных каскада Токтогульских ГЭС. Версия 1.0. «Гидроагрегаты» // «Государственное агентство по интеллектуальной собственности при правительстве Кыргызской Республики (Кыргызпатент). Центр коллективного управления имущественными правами авторов и правообладателей». Решение №7 от 05.01.2006
- 10 Апышев Д.А., Ниязов Н.Т., Такырбашев Б.К., Узагалиев З.А. Экспертная система в электроэнергетике: необходимость, структура, состояние вопроса // Вестник КТУ, – Бишкек: – 2002. – №5. – С. 85–90.
- 11 Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240с.
- 12 Клюев В.В., Пархоменко П.П., Абрамчук В.Е. и др. Технические средства диагностирования: Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 671с.
- 13 Основы технической диагностики. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза / Под ред. П.П. Пархоменко. – М.: Энергия, 1976. – 464с.
- 14 Сердаков А.С. Автоматический контроль и техническая диагностика. – Киев: Техніка, 1971. – 244с.
- 15 Асанов А.К., Ниязов Н.Т., Батырбеков Б.К. Диагностика заземляющих устройств на объектах электроэнергетики Кыргызстана // Проблемы автоматизации и управления. – Бишкек, 2015. – №1(28). – С. 131 – 135.
- 16 Fault diagnosis in dynamic systems. Theory and applications / E. by R. Patton, P. Frank, R. Clark. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1989.
- 17 Пригожин И.Р., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой // –М.: Прогресс, – 1986. – 432с.
- 18 Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. 2-е издание// – М.: КомКнига. – 2012. – 240 с.
- 19 Колесников А.А. Синергетическая теория управления // М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
- 20 Современная прикладная теория управления // под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ. – 2000. – Ч II: Синергетический подход в теории управления. – 559 с.
- 21 Николис Г., Пригожин И.Р. Самоорганизация в неравновесных системах. – М. – 1979. – 422с.

**С.М. Асанова<sup>1</sup>, Арфан аль Хакам<sup>1</sup>, Т.Ж. Жабудаев<sup>1</sup>, Т.К. Сатаркулов<sup>2</sup>,  
И.Н. Тилебаев<sup>3</sup>, Г.К. Усубалиева<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Кыргызский государственный технический университет им.И.Раззакова,  
Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: a\_sm07@mail.ru

<sup>2</sup>ОсОО "Нур Ал Энерго", г.Бишкек, ул.Исакеева 1/5, e-mail: timsat76@mail.ru

<sup>3</sup>Филиал им. академика Х.А. Рахматуллина в г. Токмок при КГТУ им.  
И.Раззакова, e-mail: gulnara.u@mail.ru

## **ОБОБЩЕННАЯ СХЕМА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ И УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ БАЛАНСОМ В НИХ**

Разрабатывается методика создания универсальной системы автоматизированного проектирования автономных распределенных гибридных энергокомплексов (АРГЭК) и методика управления энергетическим балансом в ней, т.е. потоками мощностей, циркулирующих в этой системе. Обобщенная схема методики проектирования АРГЭК состоит из следующих этапов: исследование и создание базы статистических данных об электрических нагрузках потребителей, о скорости ветра рассматриваемого региона, о гидроэнергетических ресурсах горных и равнинных рек, о солнечной энергии, а также исследование и создание базы знаний о преобразователях энергии ветра и энергии воды в электрическую энергию. Рассматривается задача синтеза оптимальной структуры распределенной гибридной системы генерации, обеспечивающей требуемый уровень генерируемой мощности и минимальную стоимость.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии; автономный распределенный гибридный энергокомплекс; энергетический баланс; система управления; синтез оптимальной структуры; ориентированный граф.

**Введение.** С развитием общества возрастает дефицит электрической энергии, вырабатываемой традиционным способом, что приводит к понижению функциональной надежности подачи их потребителям в требуемом объеме. Для разрешения данной проблемы, т.е. разгрузки существующих энергосистем, во всем мире начали уделять повышенное внимание разработке и использованию автономных энергокомплексов, функционирующих на возобновляемых (нетрадиционных) источниках энергии (ВИЭ) [1-4]. Однако мощности ВИЭ рассредоточены в пространстве, обладают низкой плотностью и имеют изменчивый характер. В связи с этим возникает необходимость в создании теоретической и методической основы к проектированию автономных энергокомплексов, включающей следующие основные задачи:

- исследование и создание базы статистических данных об электрических нагрузках потребителей;
- исследование ВИЭ для разных регионов и создание базы статистических данных;
- разработка эффективных, с позиций коэффициента полезного действия (КПД), надежности и стоимости, преобразователей ВИЭ в электрическую энергию и создание базы знаний о них на основе существующих и вновь разработанных [1-6];

- разработка теоретической и методической основы проектирования эффективных, с точки зрения структурной, функциональной надежности и стоимости (самокупаемости), автономных распределенных гибридных энергокомплексов (АРГЭК);
- разработка эффективных систем управления энергетическим балансом в АРГЭК;
- разработка систем автоматизированного проектирования АРГЭК.

**В настоящей работе** делается начальная попытка формализации вышеуказанных проблем с целью дальнейшей углубленной детализации и создания универсальной системы автоматизированного проектирования АРГЭК (САПР АРГЭК). Основным математический аппарат при разработке САПР АРГЭК – теория вычислительных сетей Петри (ВСП) [7, 8], которая является дальнейшим развитием классической теории сетей Петри [9, 10].

*1. Обобщенная схема АРГЭК, и об управлении энергетическим балансом в ней.*

Схема АРГЭК представлена на рис. 1 в виде ориентированного графа. Состоит он из следующих элементов:

- *ВГ* – распределенная система ветряных генераторов, вырабатывающая мощность  $W_{ВГ}(t) + \Delta W_{ВГ}(t)$ , где  $\Delta W_{ВГ}(t)$  – мощность, расходуемая на собственные нужды, а  $W_{ВГ}(t)$  – мощность, подаваемая в систему АРГЭК.
- *ГГ* – распределенная система гидрогенераторов, вырабатывающая мощность  $W_{ГГ}(t) + \Delta W_{ГГ}(t)$ , где  $\Delta W_{ГГ}(t)$  – мощность, расходуемая на собственные нужды, а  $W_{ГГ}(t)$  – мощность, подаваемая в систему АРГЭК.
- *СБ* – распределенная система солнечных батарей, вырабатывающая мощность  $W_{СБ}(t) + \Delta W_{СБ}(t)$ , где  $\Delta W_{СБ}(t)$  – мощность для собственных нужд, а  $W_{СБ}(t)$  – мощность, подаваемая в систему АРГЭК.
- $\{ВГ, ГГ, СБ\}$  – распределенная гибридная система генерации (РГСГ), суммарная мощность которой

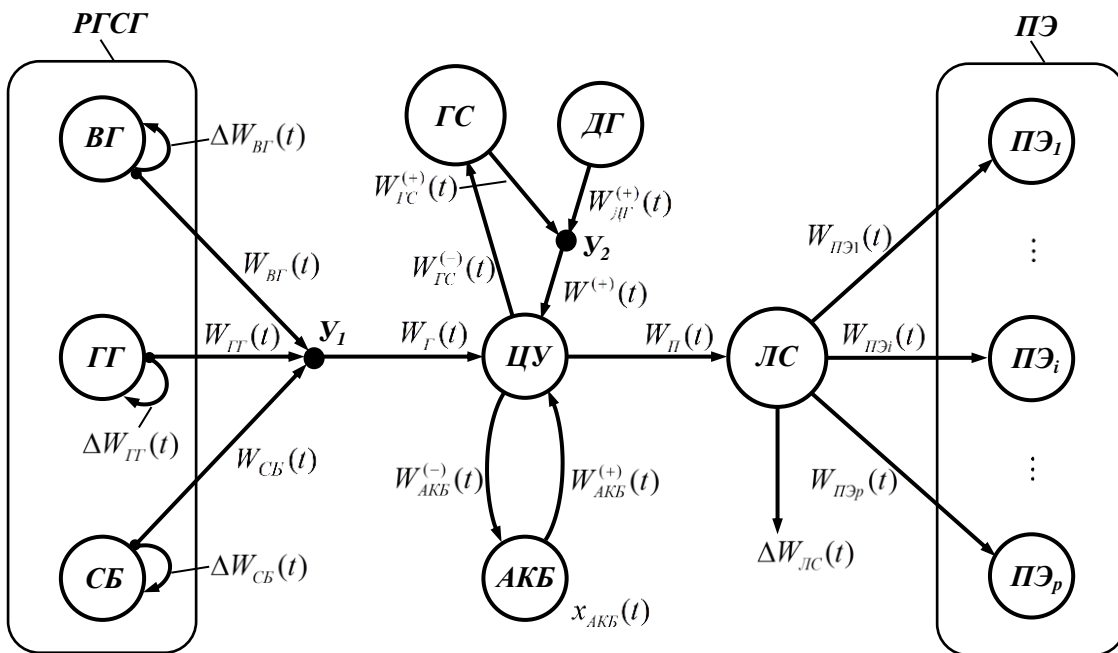


Рисунок 1 – Обобщенная схема автономных распределенных гибридных энергокомплексов (АРГЭК)

$$W_{\Gamma}(t) = W_{BG}(t) + W_{IT}(t) + W_{CB}(t). \quad (1)$$

-  $ПЭ = \{ПЭ_i | i \in N_{ПЭ}\}$  – множество потребителей электрической энергии с потребляемыми мощностями, соответственно  $\{W_{ПЭi}(t) | i \in N_{ПЭ}\}$ ; суммарная потребляемая мощность:

$$W_{ПЭ}(t) = \sum_{i \in N_{ПЭ}} W_{ПЭi}(t), \quad N_{ПЭ} = \{1, 2, \dots, p\}. \quad (2)$$

-  $АКБ$  – система аккумуляторных батарей, состояние которой – накопившееся количество электрической энергии  $x_{АКБ}(t)$ , которое может изменяться в пределах

$$x_{АКБ}^{\min} \leq x_{АКБ}(t) \leq x_{АКБ}^{\max}. \quad (3)$$

$АКБ$  предназначена для сохранения избыточной мощности  $W_{АКБ}^{(-)}(t)$ , возникшей в системе АРГЭК, и для отдачи мощности  $W_{АКБ}^{(+)}(t)$  в систему АРГЭК при ее дефиците.

-  $ЛС$  – локальная электрическая сеть системы АРГЭК, предназначенная для транспортировки и распределения требуемой мощности  $W_{Л}(t)$  по потребителям:

$$W_{Л}(t) = W_{ПЭ}(t) + \Delta W_{ЛС}(t), \quad (4)$$

где  $\Delta W_{ЛС}(t)$  – потери мощности в сети  $ЛС$ .

-  $ДГ$ ,  $ГС$  – соответственно дизельный генератор и глобальная (общегосударственная) сеть, к которым АРГЭК подключается в исключительных ситуациях: а) дефицит мощности  $W^{(+)}(t)$  в системе АРГЭК и система  $АКБ$  разряжена, т.е.  $x_{АКБ}(t) = x_{АКБ}^{\min}$ ; б) избыток мощности  $W_{ГС}^{(-)}$  в системе АРГЭК и система  $АКБ$  заряжена до максимума, т.е.  $x_{АКБ}(t) = x_{АКБ}^{\max}$ .

-  $У_1, У_2$  – узлы соединения линий электропередач.

-  $ЦУ$  – центр управления системой АРГЭК, предназначенный для управления энергетическим балансом в ней, т.е. потоками мощностей, циркулирующих в системе АРГЭК.

## 2. Обобщенная схема методики проектирования АРГЭК.

Схема проектирования АРГЭК включает в себя следующие этапы и шаги.

Этап 1. Исследование и создание базы статистических данных об электрических нагрузках потребителей  $ПЭ = \{ПЭ_i | i \in N_{ПЭ}\}$ .

*Шаг 1.* На основе наблюдений формировать временной ряд потребляемой мощности (2)  $\{W_{ПЭ}(t) | t \in T\}$ , где  $T = \{t_0, t_1, \dots, t_{\tau}\}$ ;  $t$  – дискретное время;  $\tau$  – число дискретного времени.

*Шаг 2.* Вычислить среднее значение  $\langle W_{ПЭ} \rangle_{\tau}$  потребляемой мощности и ее стандартное отклонение  $D_{ПЭ}$ :

$$\langle W_{ПЭ} \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t \in T} W_{ПЭ}(t); \quad (5)$$

$$D_{ПЭ} = \left( \frac{1}{\tau} \sum_{t \in T} (W_{ПЭ}(t) - \langle W_{ПЭ} \rangle_{\tau})^2 \right)^{1/2}. \quad (6)$$

**Этап 2.** Исследование и создание базы статистических данных скорости ветра рассматриваемого региона (рис. 2).

**Шаг 3.** На основе наблюдений формировать временной ряд скорости ветра  $\{v_{h_0}(t) | t \in T\}$  для заданной высоты (уровня)  $h_0$  (для метеостанций принято  $h_0 = 10$  м) [11].

**Шаг 4.** Вычислить среднее значение  $\langle v_{h_0} \rangle_\tau$  скорости ветра для уровня  $h_0$  и ее стандартное отклонение  $D_{h_0}$  :

$$\langle v_{h_0} \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t \in T} v_{h_0}(t); \tag{7}$$

$$D_{h_0} = \left( \frac{1}{\tau} \sum_{t \in T} (v_{h_0}(t) - \langle v_{h_0} \rangle_\tau)^2 \right)^{1/2}. \tag{8}$$

**Шаг 5.** Вычислить среднее значение скорости ветра  $\langle v_{h_i} \rangle_\tau$  для каждого уровня  $h_i$ ,  $i \in N_{yp} = \{1, 2, \dots, n_{yp}\}$  на основе вычисленной средней скорости  $\langle v_{h_0} \rangle_\tau$  (7) [11]:

$$\langle v_{h_i} \rangle_\tau = \langle v_{h_0} \rangle_\tau \cdot \left( \frac{h_i}{h_0} \right)^k, \tag{9}$$

где  $k$  – эмпирический показатель шероховатости подстилаемой поверхности земли.

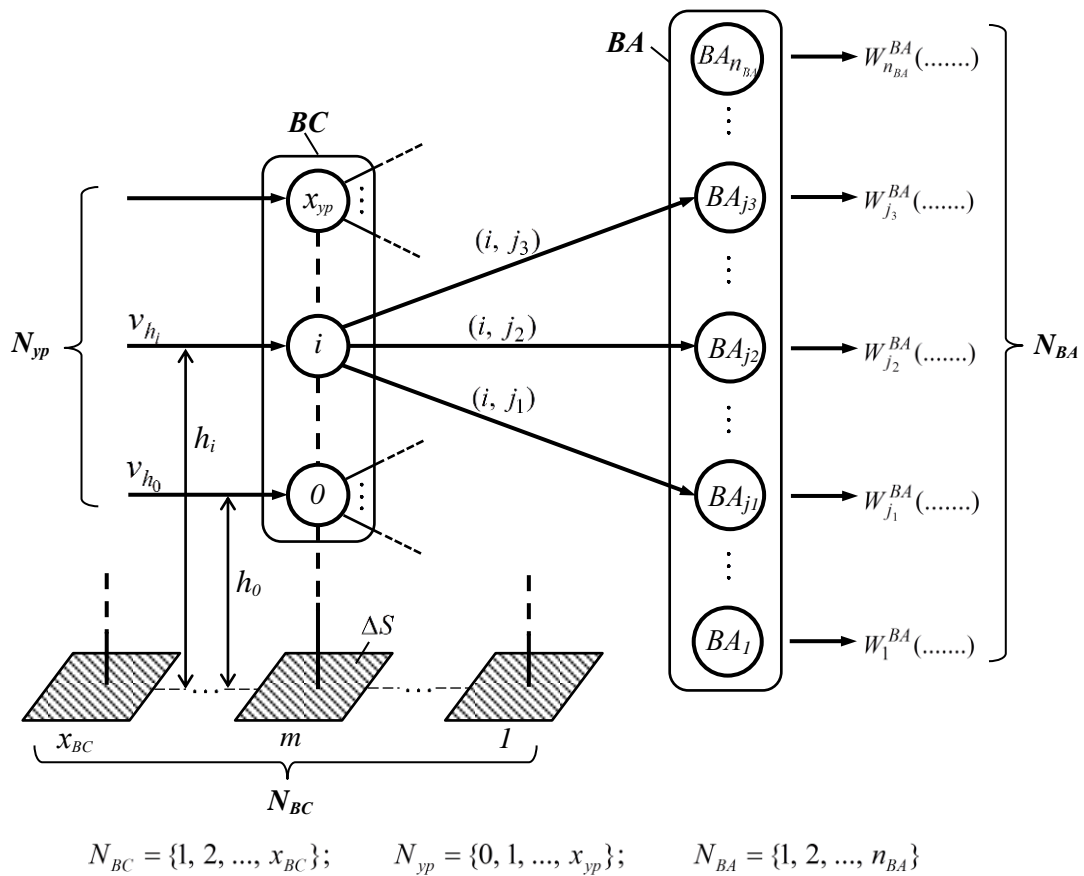


Рисунок 2 – К проектированию распределенных систем ветряных генераторов (ВГ)

**Этап 3.** Исследование и создание базы статистических данных о гидроэнергетических ресурсах горных и равнинных рек.

Граф горной реки имеет древовидную структуру, концевые узлы (стоки рек) которого рассредоточены в горах на разных высотах (уровнях), а корень графа соответствует равнинной части реки (рис. 3).

**Шаг 6.** На графе указать перспективные створы рек, где будут установлены гидроагрегаты (ГА). Для этих створов на основе наблюдений формировать временной ряд расхода воды  $\{Q_i(t) | t \in T\}$ ,  $\forall i \in N_{ГГ}$ , температуры воздуха  $\{T_i^\circ(t) | t \in T\}$ ,  $\forall i \in N_{ГГ}$ , а также базы данных об уклонах реки  $J_i$ ,  $\forall i \in N_{ГГ}$ .

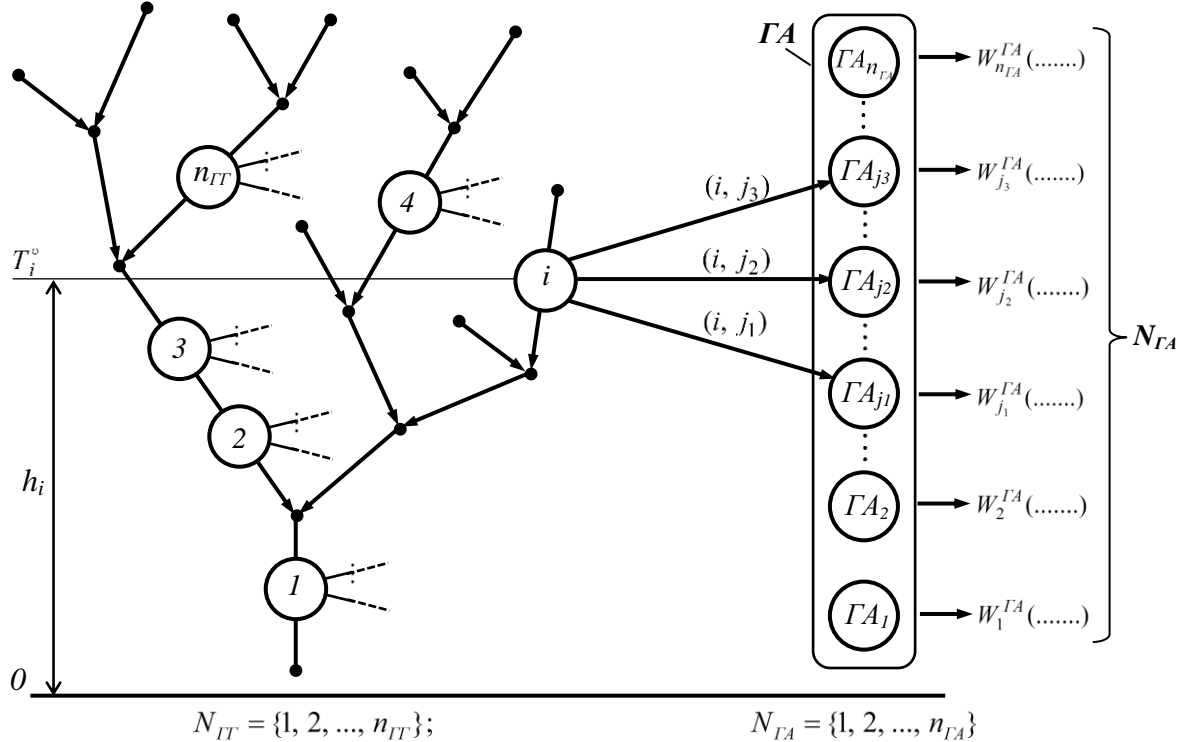


Рисунок 3 – К проектированию распределенных систем гидрогенераторов (ГГ)

**Шаг 7.** Для каждого  $i$ -го створа реки рассчитать среднее значение  $\langle Q_i \rangle_\tau$ . На основе множества (временного ряда)  $\{T_i^\circ(t) | t \in T_{зим} \subset T\}$ , где  $T_{зим}$  соответствует зимнему периоду времени, рассчитать мощности  $\{\Delta W_i^{GA}(t) | t \in T_{зим}\}$  и распределить их на период времени  $\tau$ :

$$\langle \Delta W_i^{GA} \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t \in T_{зим}} \Delta W_i^{GA}(t), \quad (10)$$

где  $\{\Delta W_i^{GA}(t) | t \in T_{зим}\}$  – мощности, используемые для обогрева легкого сооружения с целью защиты гидроагрегатов от замерзания и сохранности его работоспособности в зимний период времени  $T_{зим} \subset T$ .

**Этап 4.** Исследование и создание базы статистических данных о солнечной энергии.

*Шаг 8.* На основе наблюдений формировать временной ряд мощности  $\{W_{CB}^1(t) \mid t \in T\}$ , вырабатываемой одной панелью солнечной батареи.

*Шаг 9.* Вычислить среднее значение  $\langle W_{CB}^1 \rangle_\tau$  вырабатываемой мощности и ее стандартное отклонение  $D_{CB}^1$ :

$$\begin{aligned} \langle W_{CB}^1 \rangle_\tau &= \frac{1}{\tau} \sum_{t \in T} W_{CB}^1(t); \\ D_{CB}^1 &= \left( \frac{1}{\tau} \sum_{t \in T} (W_{CB}^1(t) - \langle W_{CB}^1 \rangle_\tau)^2 \right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (11)$$

*Этап 5.* Исследование и создание базы знаний о преобразователях энергии ветра в электрическую энергию (рис. 2).

*Шаг 10.* Формировать множество ветряных агрегатов  $BA = \{BA_j \mid j \in N_{BA}\}$ , где каждый  $j$ -ый агрегат  $BA_j$  представляет собой комплект, составленный из конструктивно совместимых одиночных преобразователей энергии ветра в электрическую;  $N_{BA} = \{1, 2, \dots, n_{BA}\}$  – множество номеров агрегатов;  $n_{BA}$  – число агрегатов. Отметим, что комплект может состоять из одного, или группы, одинаковых или разных по типу преобразователей.

*Шаг 11.* Формировать множество расчетных формул, каждая  $j$ -ая формула которого однозначно соответствует  $j$ -му элементу множества агрегатов BA:

$$\{W_j^{BA}(k_j, \eta, \langle v_{hi} \rangle_\tau, S_{BA_j}) \mid j \in N_{BA}\}, \quad (12)$$

где  $W_j^{BA}(k_j, \eta, \langle v_{hi} \rangle_\tau, S_{BA_j})$  – мощность  $j$ -го агрегата  $BA_j$ ;  $k_j$  – КПД агрегата;  $\eta$  – плотность воздуха (при нормальных условиях  $\eta = 1,225$  кг/м<sup>3</sup>);  $\langle v_{hi} \rangle_\tau$  – среднее значение скорости ветра для уровня  $h_i$ , вычисленное с помощью формул (7)-(9);  $S_{BA_j}$  – площадь ветрового потока агрегата  $BA_j$ .

Согласно [12], формула из (12) имеет вид:

$$W_j^{BA}(k_j, \eta, \langle v_{hi} \rangle_\tau, S_{BA_j}) = k_j \cdot \eta \cdot (\langle v_{hi} \rangle_\tau)^3 \cdot S_{BA_j} / 2 \quad [\text{Вт}]. \quad (13)$$

*Этап 6.* Исследование и создание базы знаний о преобразователях энергии воды в электрическую энергию (рис. 3).

*Шаг 12.* Формировать множество гидроагрегатов  $GA = \{GA_j \mid j \in N_{GA}\}$ , где каждый  $j$ -ый агрегат  $GA_j$  представляет собой комплект, составленный из конструктивно совместимых одиночных преобразователей энергии воды в электрическую;  $N_{GA} = \{1, 2, \dots, n_{GA}\}$  – множество номеров агрегатов;  $n_{GA}$  – число агрегатов. Здесь комплект может состоять из одного, или группы, одинаковых или разных по типу преобразователей.

*Шаг 13.* Формировать множество расчетных формул, каждая  $j$ -ая формула которого однозначно соответствует  $j$ -му элементу множества агрегатов GA:

$$\{W_j^{GA}(k_j, Q_j, H_j) \mid j \in N_{GA}\}, \quad (14)$$



где  $W_j^{GA}(k_j, Q_j, H_j)$  – мощность  $j$ -го агрегата  $GA_j$ ;  $k_j$  – КПД агрегата;  $Q_j$  – расход воды, протекающей через турбину;  $H$  – напор турбины.

Согласно [12], формула из (14) имеет вид

$$W_j^{GA}(k_j, Q_j, H_j) = 9810 \cdot Q_j \cdot H_j \cdot k_j \quad [\text{Вт}]. \quad (15)$$

Этап 7. Разработка эффективных, с точки зрения структурной, функциональной надежности и стоимости (самоокупаемости), автономных распределенных гибридных энергокомплексов и систем управления энергетическим балансом в них.

На данном этапе решается ряд следующих задач:

- синтез оптимальной структуры РГСГ, обеспечивающей требуемый уровень генерируемой мощности (1)  $W_r$  и минимальную стоимость;
- определение суммарной емкости  $C_{АКБ}$  системы АКБ с минимальной стоимостью, и обеспечивающей управляемость энергетического баланса в системе АРГЭК;
- синтез оптимальной структуры ЛС, обеспечивающей требуемый уровень структурной и функциональной надежности, минимум потери мощности (4)  $\Delta W_{ЛС}$  при ее транспортировке и распределении по потребителям, и минимальную стоимость;
- разработка системы управления энергетическим балансом в системе АРГЭК.

Замечание. Первая задача из вышеприведенного списка, т.е. синтез оптимальной структуры РГСГ, рассматривается ниже, а остальные вынесены за рамки настоящей работы.

Формальная постановка задачи синтеза РГСГ.

Очевидно, что с увеличением высоты увеличивается скорость ветра, а значит, и энергия воздушного потока. Поэтому каждую ветряную станцию ВС следует выполнять в виде вышки, разбитую по высоте на уровни (УР) (рис. 2). При этом номера уровней образуют множество  $N_{ур} = \{0, 1, \dots, x_{ур}\}$ , где  $x_{ур}$  – количество уровней; номеру 0 соответствует уровень  $h_0$  измерения скорости ветра  $v_{h_0}$  на метеостанции (7)-(9).

Для каждого  $i$ -го уровня ВС выбирается один-единственный  $j$ -й агрегат  $BA_j$  из подмножества альтернативных  $F_{BA}(i)$ , или же ничего не выбирается (здесь:  $i \in N_{ур}$ ;  $j \in F_{BA}(i) \subseteq N_{BA}$ ). Для примера, приведенного на рис. 2, имеем:

$$\begin{aligned} i \in N_{ур} &= \{1, 2, \dots, x_{BC}\}; \\ j \in F_{BA}(i) &= \{j_1, j_2, j_3\} \subseteq N_{BA} = \{1, 2, \dots, n_{BA}\}. \end{aligned}$$

Для каждого  $i$ -го створа реки выбирается один-единственный  $j$ -й агрегат  $GA_j$  из подмножества альтернативных  $F_{GA}(i)$ , или же ничего не выбирается (здесь:  $i \in N_{ГТ}$ ;  $j \in F_{GA}(i) \subseteq N_{GA}$ ). Для примера, приведенного на рис. 3, имеем:

$$\begin{aligned} i \in N_{ГТ} &= \{1, 2, \dots, n_{ГТ}\}; \\ j \in F_{GA}(i) &= \{j_1, j_2, j_3\} \subseteq N_{GA} = \{1, 2, \dots, n_{GA}\}. \end{aligned}$$

На основе вышесказанных формул (1)-(15) и иллюстративных рисунков 1, 2, 3, запишем формальную постановку задачи синтеза РГСГ в следующей форме.

Целевая функция  $J$ :

$$J = J_{BG} + J_{ГТ} + J_{CB}, \quad (16)$$

где 
$$J_{BG} = \left[ \sum_{i=1}^{x_{yp}} \left( \sum_{j \in F_{BA}(i)} C_j^{BA} \cdot x_{ij}^{BA} \right) + C_{BC}(h_{x_{yp}}) + C_{\Delta S} \right] \cdot x_{BC}, \quad (17)$$

$$J_{GG} = \sum_{i \in N_{GG}} \sum_{j \in F_{GA}(i)} C_j^{GA} \cdot x_{ij}^{GA}, \quad (18)$$

$$J_{CB} = C_{CB} \cdot x_{CB}.$$

Система ограничений:

$$W_{BG} + W_{GG} + W_{CB} \geq \langle W_{ПЭ} \rangle_{\tau}, \quad (19)$$

$$W_{BG} = \left[ \sum_{i=1}^{x_{yp}} \sum_{j \in F_{BA}(i)} (W_j^{BA}(k_j, \eta, \langle v_{hi} \rangle_{\tau}, S_j^{BA}) - \Delta W_j^{BA}) \cdot x_{ij}^{BA} \right] \cdot x_{BC}, \quad (20)$$

$$W_{GG} = \sum_{i \in N_{GG}} \left[ \left( \sum_{j \in F_{GA}(i)} W_j^{GA}(k_j, Q_j, H_j) \cdot x_{ij}^{GA} \right) - \langle \Delta W_i^{GA} \rangle_{\tau} \right], \quad (21)$$

$$W_{CB} = \langle W_{CB}^1 \rangle_{\tau} \cdot x_{CB}, \quad (22)$$

$$\left( \sum_{j \in F_{BA}(i)} x_{ij}^{BA} \right) \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N_{yp} = \{1, 2, \dots, x_{yp}\}, \quad (23)$$

$$\left( \sum_{j \in F_{GA}(i)} x_{ij}^{GA} \right) \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N_{GG} = \{1, 2, \dots, n_{GG}\}. \quad (24)$$

$$\begin{cases} x_{yp} \in N = \{1, 2, \dots\}, \\ x_{BC} \in N = \{1, 2, \dots\}, \\ x_{CB} \in N = \{1, 2, \dots\}, \\ x_{ij}^{BA} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in F_{BA}(i), \quad \forall i \in N_{yp} = \{1, 2, \dots, x_{yp}\}, \\ x_{ij}^{GA} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in F_{GA}(i), \quad \forall i \in N_{GG} = \{1, 2, \dots, n_{GG}\}. \end{cases} \quad (25)$$

Неизвестные величины:

$$x_{yp}, x_{BC}, x_{CB}, \{x_{ij}^{BA} \mid j \in \Gamma_{BA}(i), i \in N_{yp}\}, \{x_{ij}^{GA} \mid j \in F_{GA}(i), i \in N_{GG}\} \quad (26)$$

Задача синтеза РГСГ. Найти такие значения неизвестных величин из (26), которые удовлетворяли бы систему ограничений (19)-(25), и обеспечили бы минимальное значение целевой функции (16), т.е. необходимо решить следующую задачу оптимизации:

$$\min_{\substack{\text{по переменным} \\ \text{из (26)}}} \{J \mid \text{при ограничениях (19)–(25)}\}. \quad (27)$$

Здесь:  $J$  – целевая функция – стоимость синтезируемой РГСГ;

$J_{ВГ}, J_{ГГ}, J_{СБ}$  – стоимость распределенной системы, соответственно, ветряных генераторов ВГ, гидрогенераторов ГГ, солнечных батарей СБ (16)-(18);

$C_j^{BA}$  – стоимость  $j \in F_{BA}(i)$ -го агрегата  $BA_j$  с номером  $j$  из подмножества альтернативных номеров  $F_{BA}(i)$ , соответствующее  $i \in N_{yp}$ -му модулю (уровню) ВС (см. рис. 2);

$x_{ij}^{BA} \in \{0, 1\}$  – моделирует: если  $x_{ij}^{BA} = 1$ , то выбрать для  $i$ -го модуля агрегат  $BA_j$ , в противном случае (т.е. при  $x_{ij}^{BA} = 0$ ) – отменить ( $x_{ij}^{BA}$  – неизвестная величина);

$C_{BC}(h_{x_{yp}})$  – стоимость вышки станции ВС, зависящая от высоты  $h_{x_{yp}}$   $i = x_{yp}$ -го уровня (см. рис. 2);

$C_{\Delta S}$  – стоимость площадки  $\Delta S$ , занимаемой станцией ВС (см. рис. 2);

$x_{BC}$  – количество станций ВС (неизвестная величина);

$C_j^{GA}$  – стоимость  $j \in F_{GA}(i)$ -го агрегата  $GA_j$  с номером  $j$  из подмножества альтернативных номеров  $F_{GA}(i)$ , соответствующее  $i \in N_{ГГ}$ -му створу реки (см. рис. 3);

$x_{ij}^{GA} \in \{0, 1\}$  – моделирует: если  $x_{ij}^{GA} = 1$ , то выбрать для  $i$ -го створа реки агрегат  $GA_j$ , в противном случае (т.е. при  $x_{ij}^{GA} = 0$ ) – отменить ( $x_{ij}^{GA}$  – неизвестная величина);

$C_{СБ}$  – стоимость одной панели системы солнечных батарей СБ;

$x_{СБ}$  – количество панелей системы СБ (неизвестная величина);

выражение (19) – требование к суммарной генерируемой мощности распределенной гибридной системой РГСГ, состоящей из ВГ, ГГ, СБ (см. (1)-(15) и рисунки 1, 2, 3);

выражения (20)-(22) – мощности, вырабатываемые системами, соответственно, ВГ, ГГ, СБ;  $\Delta W_j^{BA}, \Delta W_i^{GA}$  – мощности на собственные нужды агрегатов, соответственно,  $BA_j, GA_i$  (см. (1)-(15) и рисунки 1, 2, 3);

выражение  $\left( \sum_{j \in F_{BA}(i)} x_{ij}^{BA} \right) \in \{0, 1\}$  из (23) – моделирует: установлен ли в  $i$ -ый модуль ВС хоть один агрегат  $BA_j$  с номером  $j$  из подмножества альтернативных номеров  $F_{BA}(i)$  ;

выражение  $\left( \sum_{j \in F_{GA}(i)} x_{ij}^{GA} \right) \in \{0, 1\}$  из (24) – моделирует: установлен ли в  $i$ -ый створ реки хоть один агрегат  $GA_j$  с номером  $j$  из подмножества альтернативных номеров  $F_{GA}(i)$ .

**Заключение.** Таким образом, в данной работе были рассмотрены следующие вопросы: исследование и создание базы статистических данных об электрических нагрузках потребителей, о скорости ветра рассматриваемого региона, о гидроэнергетических ресурсах горных и равнинных рек, о солнечной энергии, а также исследование и создание базы знаний о преобразователях энергии ветра и энергии воды в электрическую энергию. Была рассмотрена задача синтеза оптимальной структуры распределенной гибридной системы генерации, обеспечивающей требуемый уровень генерируемой мощности и минимальную стоимость.

Была предложена обобщенная схема методики проектирования автономных распределенных гибридных энергокомплексов и управление энергетическим балансом в них. То есть, в работе делается начальная попытка формализации вышеуказанных вопросов с целью дальнейшей углубленной детализации и создания универсальной системы автоматизированного проектирования (САПР) АРГЭК.

В дальнейшем, при разработке САПР АРГЭК, будет использован математический аппарат вычислительных сетей Петри [7, 8], который является дальнейшим развитием классической теории сетей Петри. [9],

**Благодарность.** Авторы выражают особую благодарность Асанову Мурату Сатаркуловичу, кандидату технических наук, доценту кафедры «ТОЭ и ОЭ» Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова, за важнейшие советы и консультации в области технической кибернетики.

***Литература:***

1. Люкайтис В.Ю., Глушков С.Ю. Автономные энергокомплексы, гибридные конструкции с применением возобновляемых источников энергии // Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы. 2019. Т.2 Вып.2. С. 111-120.
2. Велькин В. И. Методология расчета комплексных систем ВИЭ для использования на автономных объектах. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – 226 с.
3. Попель О.С. Возобновляемые источники энергии: роль и место в современной и перспективной энергетике // Рос. Хим.ж., Т. LII, No6. 2008.- С.95-105.
4. Барина В.А., Ланьшина Т.А. Особенности развития возобновляемых источников энергии в России и в мире // Российское предпринимательство. – 2016. – Т.17. – №2. – С. 259-270.
5. Бакасова А.Б., Ниязова Г.Н., Сатаркулов Т.К., Бузурманкулова Ч.М., Дюшеева Ч.К. Применение сред MatLab и Labview для демонстрации динамического поведения гидроагрегата нового типа // Проблемы автоматизации и управления: науч.-техн. журн. НАН КР. – Бишкек: ИАИТ, 2019. – №1(36). – С. 30-39.
6. Акчалов Ш.А., Рыскулов Р.Р., Толукбаев Ш.К. Динамическая характеристика ветротурбины, работающей при малых скоростях ветра // Проблемы автоматизации и управления: науч.-техн. журн. НАН КР. – Бишкек: ИАИТ, 2015. – №2(29). – С. 90-95.
7. Асанов М.С., Асанова С.М., Сатаркулов К.А. Структурная модель вычислительных сетей Петри // Известия КГТУ. – Бишкек, 2008. – №13. – С. 78-85.
8. 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.
9. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 160 с.
10. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
11. <https://seiger.pp.ua/zavisimost-skorosti-vetra-ot-vysoty-i-mestnosti/> (дата обращения: 05.12.2019).
12. <http://vetrodvig.ru/moshhnost-vetrogeneratora-vetrovojj-turbiny-raschet-otnositelno-skorosti-vetra/> (дата обращения: 05.12.2019).

*И.В. Бочкарев, М.Г. Гунина, Д.Н. Садыков, Б. К. Мусабеков,  
Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР  
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова*

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ**

Предложена методика расчета электромагнитных механизмов, содержащих постоянные магниты для создания тормозного усилия и замыкания фрикционного узла. Методика включает расчет параметров возвратной пружины, с учетом разброса величин тока управляющей обмотки, обусловленного технологическим разбросом параметров постоянного магнита и размеров магнитопровода, нестабильностью напряжения сети, а также изменением сопротивления обмотки вследствие ее нагрева. Показано, что при расчете электромагнитного привода поэтапно решаются две задачи: задача расчета магнитодвижущей силы (МДС), (задача синтеза, или “прямая” задача), и задача расчета магнитных потоков, протекающих по разным участкам магнитной цепи при известных значениях МДС (задача анализа или “обратная” задача). Соответственно, расчет разделен на два этапа: предварительное определение размеров магнитопровода и обмоточных данных и уточненный расчет параметров постоянного магнита с корректировкой геометрических размеров и обмоточных данных управляющего электромагнита.

**Ключевые слова:** электромагнитный механизм с постоянными магнитами, фрикционный узел, управляющий электромагнит, якорь, возвратная пружина, тормозной момент.

### **Введение**

Развитие современного промышленного производства предполагает широкое использование высокоэффективного оборудования, предназначенного для работы в различных системах автоматического регулирования. Развитие автоматизации обеспечивает повышенную точность выполнения заданных операций, расширение эксплуатационных возможностей и повышение производительности работы. Для обеспечения функционирования такого оборудования необходимо наличие различных технических средств, которые являются основными структурными элементами, влияющим на конструкцию и эксплуатационные возможности любого механизма.

Особое значение на современном этапе развития техники имеет развитие и совершенствование электромеханических элементов автоматизации, как основного звена автоматизации. Основная тенденция их развития заключается в обеспечении высоких технико-экономических показателей, надежности и долговечности при простоте обслуживания и ремонта [1–3].

В состав элементов автоматизации входит обширный класс электромеханических устройств, при помощи которых осуществляется преобразование входного электрического сигнала в механическую энергию на его выходе. Их широкое применение объясняется тем, что при достаточно простой конструкции и компактности они позволяют при малых величинах входного сигнала получить большие силы или моменты на выходе и тем самым без особых затрат осуществить автоматизацию производственного цикла. Следует отметить, что в автоматизированный электропривод, составляющий силовую основу большинства производственного оборудования, входит большое количество различных механических, электрических, электронных и других узлов, которые обеспечивают перемещение рабочего органа с заданными скоростью, точностью и

быстродействием. Очевидно, что силовые электромагнитные механизмы (ЭММ), входящие в состав электромеханической системы, однозначно определяют возможности и характеристики всей системы.

Из всего многообразия ЭММ для дальнейшего исследования выбраны фрикционные муфты и тормоза с электромагнитным дистанционным управлением, содержащие постоянные магниты [4, 5]. В настоящее время такие силовые электромагнитные механизмы с постоянными магнитами (ЭММ ПМ) все более широко используются в электроприводах автоматизированных систем в качестве элементной базы различных автоматизированных электромеханических систем. Такие ЭММ ПМ применяются в станкостроении, робототехнике, авиации и во многих других областях техники. Наряду с автоматизированным оборудованием, которое управляется различными автоматическими системами, в том числе с числовым программным управлением, ЭММ ПМ применяются также и в электроприводах других механизированных машинных агрегатов: в различных силовых установках (например, в силовых электромагнитах, в электроприводах подъемно-транспортных машин и механизмов), в регулирующих устройствах (например, в электромагнитных клапанах) и т.д.

Следует подчеркнуть, что создание ЭММ ПМ, полностью обеспечивающих выполнение предъявляемых к ним эксплуатационных требований, является достаточно сложной инженерной задачей. Это объясняется тем, что в общем случае, ЭММ ПМ являются совмещением трех основных узлов: фрикционного узла, электромагнитного привода, выполненного в виде управляющего электромагнита, и электронной системы управления (СУ), обеспечивающей подачу на обмотку электромагнита знакопостоянного напряжения, изменяющегося по определенному закону.

Следовательно, разработка инженерной методики расчета ЭММ ПМ с заданными эксплуатационными параметрами является важной и актуальной задачей.

### Расчет параметров возвратной пружины

В качестве базового варианта выберем конструкцию ЭММ ПМ, показанную на рис. 1. В данном случае ЭММ ПМ используется в режиме фрикционного тормоза.

Тормоз состоит из управляющего электромагнита (УЭ), содержащего обмотку 4, дисковый якорь 5 и магнитопровод, и фрикционного узла, образованного якорем 5 и торцами магнитопровода. Якорь 5 закреплен на упругой мембране 6, которая при помощи цанги 8 устанавливается на валу 7. Упругая мембрана играет роль возвратной пружины. Магнитопровод состоит из наружного 3 и внутреннего 9 полюса и фланца 1, который закреплен на подшипниковом щите 10 электродвигателя. Между фланцем 1 и дисковой частью наружного полюса расположен кольцевой постоянный магнит 2. Фрикционный узел образован торцами полюсов 3, 9 и якорем 5.

При обесточенной обмотке 4 магнитный поток  $\Phi_{ПМ}$  постоянного магнита замыкается по цепи «наружный полюс – якорь – внутренний полюс – фланец» и, преодолевая усилие упругого диска, притягивает якорь к полюсам. Таким образом, за счет сил трения вал 7 двигателя заторможен.

При подаче напряжения на обмотку она создает магнитный поток  $\Phi_{ЭЛ}$ , который направлен встречно потоку  $\Phi_{ПМ}$  и вытесняет его из якоря. Под действием силы упругости  $F_{ПР}$  мембраны якорь отходит от полюсов и между ними появляется рабочий зазор  $\delta_p$  (рис. 1), т.е. фрикционный узел размыкается и вал освобождается. Поток  $\Phi_{ПМ}$  при этом замыкается по цепи «дисковая часть наружного полюса 3 – внутренний полюс 9 – фланец 1».

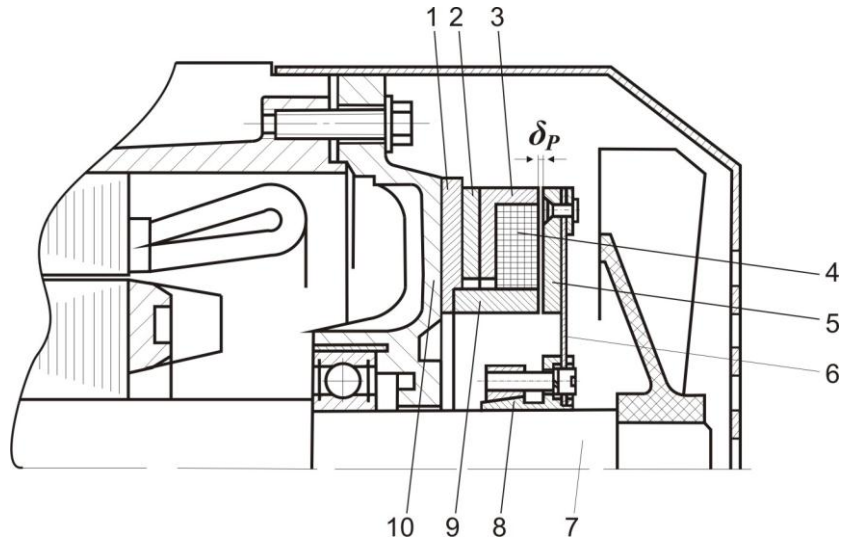


Рисунок 1 – Конструкция активных частей тормозного фрикционного ЭММ ПМ, встроенного в асинхронный двигатель (фрикционный узел показан в разомкнутом положении)

Таким образом, положение якоря относительно полюсов магнитопровода определяет эксплуатационное состояние фрикционного узла ЭММ ПМ, которое зависит от соотношения трех показателей:

- тягового усилия  $F_{ПМ}$ , создаваемого магнитным потоком  $\Phi_{ПМ}$  постоянного магнита;
- тягового усилия  $F_{ЭМ}$ , создаваемого магнитным потоком  $\Phi_{ЭЛ}(i)$  электромагнита;
- силы упругости  $F_{ПР}$  возвратной пружины.

Значение суммарного тягового усилия  $F_T$ , действующего на якорь, в общем случае равно

$$F_T = F_{ПМ} \pm F_{ЭМ} - F_{ПР}. \quad (1)$$

Изменение усилия  $F_T$  от величины тока  $i$  УЭ показана на рис. 2.

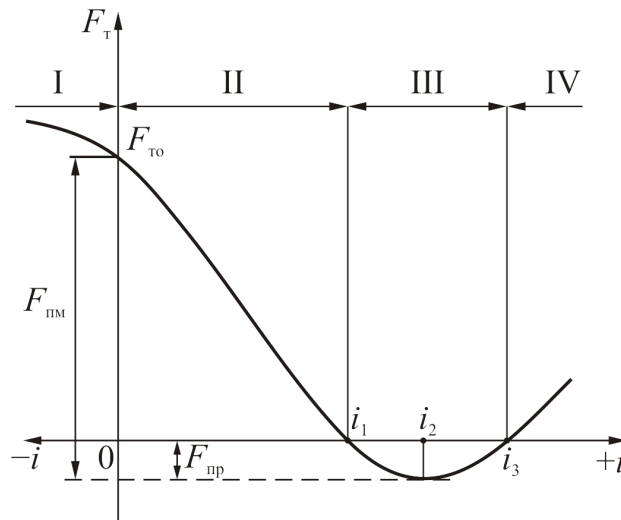


Рисунок 2 – Зависимость тягового усилия  $F_T$  от тока  $i$  в обмотке управляющего электромагнита

При отключенной обмотке, т.е. при  $\Phi_{ЭЛ}(i) = 0$ , величина тягового усилия  $F_T$ , действующего на якорь, равна  $F_{ТО}$

$$F_{TO} = F_{ПМ}(\delta_0) - F_{ПР}(\delta_0), \quad (2)$$

где  $\delta_0$  – остаточный эквивалентный воздушный зазор между якорем и полюсами электромагнита.

Значение зазора  $\delta_0$  зависит от чистоты обработки сопрягаемых поверхностей якоря и полюсов, а также от качества сборки фрикционного узла.

Разобьем область возможных значений тока  $i$  на четыре зоны, причем в зоне I потока  $\Phi_{ПМ}$  и  $\Phi_{эл}$  действуют согласно, а в зонах II, III и IV эти потоки действуют встречно:

- в зоне I, когда ток  $i$  отрицателен, имеем  $F_T > F_{TO}$  и фрикционный узел замкнут;
- в зоне II при  $0 < i < i_1$  фрикционный узел продолжает оставаться замкнутым за счет недокомпенсации потока  $\Phi_{ПМ}$  потоком  $\Phi_{эл}$ ;
- в зоне III при  $i_1 < i < i_3$  фрикционный узел разомкнут;
- в зоне IV при  $i > i_3$  фрикционный узел замкнут за счет перекомпенсации потока  $\Phi_{ПМ}$  потоком  $\Phi_{эл}$ .

Следовательно, в каждой из указанных зон тяговое усилие  $F_T$ , действующее на якорь, равно

$$\left. \begin{aligned} F_T^I(\delta_0, i) &= F_{ПМ}(\delta_0) + F_{ЭМ}(i, \delta_0) - F_{ПР}(\delta_0) \geq 0; \\ F_T^{II}(\delta_0, i) &= F_{ПМ}(\delta_0) - F_{ЭМ}(i, \delta_0) - F_{ПР}(\delta_0) \geq 0; \\ F_T^{III}(\delta_p, i) &= F_{ПМ}(\delta_p) - F_{ЭМ}(i, \delta_p) - F_{ПР}(\delta_p) \leq 0; \\ F_T^{IV}(\delta_0, i) &= F_{ЭМ}(i, \delta_0) - F_{ПМ}(\delta_0) - F_{ПР}(\delta_0) \geq 0; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Таким образом, фрикционный узел разомкнут только в зоне III, причем, как это видно из рис. 2, величина этой зоны определяется величиной силы  $F_{ПР}$ . Следовательно, фрикционный узел может быть переведен в разомкнутое состояние лишь при величине тока обмотки управляющего электромагнита, значение которого находится в диапазоне  $i_1 < i < i_3$ . Однако при эксплуатации ЭММ ПМ наблюдается разброс величин тока обмотки, обусловленный следующими причинами:

- технологическим разбросом параметров ПМ и размеров магнитопровода УЭ, что не позволяет гарантировать точное значение потока  $\Phi_{ПМ}$ ;
- нестабильностью напряжения сети;
- изменением сопротивления обмотки вследствие ее нагрева.

Последние две причины приводят к нестабильности магнитного потока  $\Phi_{эл}(i)$ .

Получим формулу для расчета требуемой силы упругости  $F_{np}$  возвратной пружины с учетом отклонения указанных параметров от их номинальных значений.

В ЭММ ПМ магнитный поток  $\Phi_{эл}$  УЭ изменяется пропорционально его току  $i$ , величина которого определяется напряжением питания  $U_{ном}$  и активным сопротивлением  $R$  обмотки. Примем, что максимальное и минимальное значения ожидаемых отклонений напряжения сети от номинального значения  $U_{ном}$  равны соответственно  $U_{max}$  и  $U_{min}$ , а сопротивления обмотки в нагретом и холодном состояниях равны  $R_{Г}$  и  $R_{Х}$ .

Тогда предельные отклонения магнитного потока  $\Phi_{эл}$  от его номинального значения  $\Phi_{ном}$  будут равны:

$$\Phi_{эл.max} = \Phi_{НОМ} \cdot K_{U.max}; \quad (1)$$

$$\Phi_{эл.min} = \Phi_{НОМ} \cdot K_{U.min} / K_R, \quad (2)$$

где  $K_{U.max} = U_{max} / U_{ном}$ ;  $K_{U.min} = U_{min} / U_{ном}$ ;  $K_R = R_{Г} / R_{Х}$ .

Максимальное  $\Phi_{ПМ.max}$  и минимальное  $\Phi_{ПМ.min}$  значения магнитного потока постоянного магнита равны:

$$\Phi_{ПМ.max} = \Phi_{НОМ} \cdot K_{ПМ.max}; \quad (3)$$

$$\Phi_{эл.min} = \Phi_{НОМ} \cdot K_{ПМ.min}, \quad (4)$$



где  $K_{ПМ,max}$  и  $K_{ПМ,min}$  – коэффициенты разброса параметров ПМ.

Как показал проведенный анализ, значения указанных коэффициентов могут быть приняты равными следующим величинам:

$$K_{ПМ,max} = 1,10 \div 1,15 \text{ и } K_{ПМ,min} = 0,85 \div 0,9; K_{U,max} = 1,1 \text{ и } K_{U,min} = 0,85; K_R = 1,3.$$

При полной компенсации потоков  $\Phi_{ЭЛ}$  и  $\Phi_{ПМ}$  будет выполняться равенство

$$\Phi_{ЭЛ} = \Phi_{ПМ} = \Phi_{ном}. \quad (5)$$

После подачи напряжения на обмотку УЭ с целью размыкания фрикционного узла, при неполной компенсации указанных потоков в якоре будет оставаться остаточный магнитный поток  $\Phi_0$ , который будет продолжать притягивать якорь к полюсам магнитопровода. Для наиболее неблагоприятных сочетаний отклонений вышеуказанных параметров, остаточный поток  $\Phi_0$  в будет равен

$$\Phi_0 = \Phi_{ПМ,max} - \Phi_{ЭЛ,min} \text{ или } \Phi_0 = \Phi_{ЭЛ,max} - \Phi_{МП,min}. \quad (6)$$

Т.е. поток постоянного магнита  $\Phi_{ПМ}$  в якоре будет, соответственно, или недокомпенсированным, или перекомпенсированным.

Остаточный магнитный поток  $\Phi_0$  создаст усилие  $P_0$

$$P_0 = \Phi_0^2 / (\mu \cdot S_n). \quad (7)$$

Усилие  $P_0$  старается удержать якорь электромагнита притянутым к полюсам. Поэтому фрикционный узел разомкнется только в том случае, если усилие  $F_{ПР}$  возвратной пружины будет больше усилия  $P_0$ , т.е. при

$$F_{ПР} \geq P_0. \quad (8)$$

Подставляя в (8) выражения (1) ÷ (7), получим

$$F_{ПР} \geq \left( K_{ПМ,max} - \frac{K_{U,min}}{K_R} \right)^2 \cdot \frac{\Phi_{ном}^2}{\mu_0 / S_n};$$

$$F_{ПР} \geq (K_{U,max} - K_{ПМ,min})^2 \cdot \frac{\Phi_{ном}^2}{\mu_0 / S_n}. \quad (9)$$

Величина  $\Phi_{ном}^2 / (\mu_0 / S_n)$  определяет усилие  $F_{ПМ}$ , развиваемое постоянным магнитом при отключенной обмотке управляющего электромагнита, то есть при  $\Phi_{ЭЛ} = 0$ . Выразив  $F_{ПМ}$  через усилие  $F_{ТО}$ , равное при  $\Phi_{ЭЛ} = 0$  разности  $(F_{ПМ} - F_{нр})$ , придадим следующий вид требованиям, предъявляемым к  $F_{нр}$ :

$$F_{ПР} \geq \frac{F_{ТО} (K_{ПМ,max} - K_{U,min} / K_R)^2}{1 - (K_{ПМ,max} - K_{U,min} / K_R)^2};$$

$$F_{ПР} \geq \frac{F_{ТО} (K_{U,max} - K_{ПМ,min})^2}{1 - (K_{U,max} - K_{ПМ,min})^2}. \quad (10)$$

Здесь  $F_{ТО}$  вычисляются, исходя из требуемого в задании номинального момента трения

$$F_{ТО} = M_{Т,НОМ} / (k_{тр} \cdot R_{ср}), \quad (11)$$

где  $R_{ср}$  – средний радиус действия силы трения, который определяется конструкцией и размерами фрикционного узла;  $k_{тр}$  - коэффициент трения.

### Расчет электромагнитного привода ЭММ ПМ

Расчет электромагнитного привода ЭММ ПМ целесообразно разделить на два этапа:

– поисковый расчет, заключающийся в предварительном определении размеров магнитопровода и обмоточных данных обмотки УЭ, а также силы упругости возвратной пружины, способных обеспечить требуемые по техническому заданию выходные параметры;

– уточненный расчет, заключающийся в определении параметров постоянного

магнита и корректировке геометрических размеров и обмоточных данных УЭ.

Эскиз магнитной системы фрикционных ЭММ ПМ показан на рис. 3.

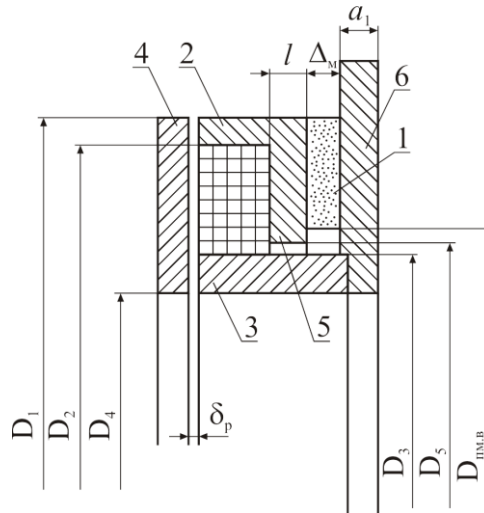


Рисунок 3 – Эскиз магнитной системы фрикционных ЭММ ПМ

В сущности, выполняется расчет разветвленной магнитной цепи УЭ и указанные этапы расчета решают две задачи:

- задача расчета магнитодвижущей силы (МДС), которая необходима для создания требуемой величины магнитной индукции (задача синтеза или “прямая” задача);
- задача расчета магнитных потоков, протекающих по разным участкам магнитной цепи при известных значениях МДС (задача анализа или “обратная” задача) [6, 7].

**Поисковый расчет.** При изготовлении ЭММ ПМ технологически невозможно намагничивать постоянные магниты уже в собранной магнитной системе. Поэтому целесообразно использовать металлокерамические ферритбариевые магниты, например, марки 24 БА210, которые при изменении внешних условий размагничиваются несущественно [8]. Такие магниты имеют большую коэрцитивную силу  $H_c$  и малую остаточную индукцию  $B_r$  [9], за счет чего увеличение их осевого размера мало влияет на значение  $\Phi_{ПМ}$ . Анализ известных ЭММ ПМ показал, что толщина магнита обычно составляет  $\Delta_M = 5 \div 6$  мм (рис. 3).

Поскольку магниты данной группы имеют низкую индукцию в нейтральном сечении, то для улучшения показателей ЭММ ПМ используют эффект «трансформации» магнитной индукции [10], который состоит в следующем.

Индукции на полюсе магнита  $B_{ПМ}$  и на полюсе магнитопровода  $B_{П}$  соответственно равны

$$B_{ПМ} = \Phi_{ПМ} / S_m; \quad B_{П} = \Phi_{ПМ} / S_n, \quad (12)$$

где  $S_m$  и  $S_n$  - площади полюса постоянного магнита и магнитопровода.

Из этих выражений следует, что

$$B_{П} = B_{ПМ} / S_n. \quad (13)$$

Таким образом, выполнив условие  $S_n < S_m$ , обеспечивают  $B_{П} > B_{ПМ}$ . Этот эффект и называют «трансформация индукции».

Очевидно, что диаметральные размеры магнитопровода УЭ зависят от размеров электродвигателя, для которого предназначен проектируемый тормоз. Из рис. 2.1 следует, что диаметр  $D_1$  надо вычислять с учетом высоты оси вращения двигателя  $h_{вр}$ , а диаметр  $D_4$  – с учетом наружного диаметра подшипникового узла  $D_{пш}$ . Это обеспечит возможность встраивания тормоза в электродвигатель. При этом для удобства определения  $D_4$  в инженерных расчетах проще ориентироваться на наружный диаметр под-

шипника  $D_{нод}$ .

Анализ показал, величины  $D_1$  и  $D_4$  можно связать с размерами  $h_{ер}$  и  $D_{нод}$  следующими зависимостями:

$$D_1 = (1,3 \div 1,5) h_{ер}; D_4 = (1,2 \div 1,6) D_{нод}. \quad (14)$$

Величину  $\delta_0$  при расчете может быть принято  $\delta_0 = 0,05 \div 0,15$  мм. Поскольку фрикционные поверхности якоря и полюсов при работе тормоза стираются и тем самым воздушный рабочий зазор  $\delta_p$  в процессе эксплуатации изменяется, то расчет зазора  $\delta_p$  надо вести по конечному допустимому значению. Как показал анализ, эта величина обычно составляет  $\delta_p \leq 1 \div 2$  мм.

Зазор  $\delta_\delta$  между цилиндрической частью наружного полюса 3 и внутренним полюсом 9 (рис. 1) следует выбирать с учетом величины  $\delta_p$ . Получено, что его наиболее целесообразно выбирать в пределах  $\delta_\delta = (4 \div 5) \delta_p$ .

После выбора значений  $\Delta_M, D_1, D_4, \delta_0, \delta_p, \delta_\delta$  и вычисления  $F_{ПР}$  и  $F_{Т0}$  по (10) и (11) с учетом требуемой величины момента трения  $M_{тр}$  предварительный расчет проводится в следующей последовательности.

В соответствии с рис. 2 вычисляют требуемое тяговое усилие  $F_{ПМ}$ , которое должен обеспечить постоянный магнит

$$F_{ПМ} = F_{Т0} + F_{нр} \quad (15)$$

Затем выбирают по условиям обеспечения оптимального насыщения допустимую индукцию  $B_{н.дон}$  в магнитопроводе и рассчитывают диаметральные размеры магнитопровода:

$$D_2 = \sqrt{D_1^2 - 4/(\pi \cdot S_n)}; D_3 = \sqrt{D_4^2 + 4/(\pi \cdot S_n)}, \quad (16)$$

где  $S_n = \mu_0 F_{ПМ} / B_{н.дон}^2$ .

Требуемая площадь  $S_{ПМ}$  полюса постоянного магнита с учетом коэффициента рассеяния  $\sigma_p$  его магнитного потока определяется:

$$S_{ПМ} = \frac{B_n}{B_m} S_n \sigma_p, \quad (17)$$

где значение индукции  $B_m$  принимаем для случая, когда рабочая точка постоянного магнита находится на пересечении наиболее неблагоприятной прямой возврата с осью ординат (зависит от материала магнита).

Значение  $\sigma_p$  для выбранной конструктивной схемы тормоза, как показал анализ магнитных систем электромагнитных устройств с постоянными магнитами, целесообразно выбрать равным  $\sigma_p = 1,2 \div 1,4$ .

Для определения осевых размеров магнитопровода необходимо определить размеры обмотки электромагнита. Средний диаметр обмотки  $D_{ср}$  и ширина паза под обмотку  $b$  вычисляются по следующим формулам:

- ширина паза под обмотку

$$b = (D_2 - D_3) / 2. \quad (18)$$

- величина среднего диаметра обмотки:

$$D_{ср} = (D_2 + D_3) / 2. \quad (19)$$

Толщину якоря  $h_я$  и высоту спинки магнитопровода  $h_c$  необходимо обеспечить такими, чтобы эти участки магнитной цепи не насыщались. Поскольку их максимальное насыщение будет там, где в них входит поток из внутреннего полюса, то в этом месте сечения якоря  $S_я$  и спинки  $S_c$  должны быть равны сечению  $S_n$ . Тогда имеем

$$h_я = h_c = \frac{S_n}{\pi \cdot D_3}. \quad (20)$$

Число витков обмотки УЭ

$$W = U / (\rho \cdot j \cdot \pi \cdot D_{ср}) \quad (21)$$

Пренебрегая магнитным сопротивлением магнитопровода, МДС  $F$  обмотки равна:

$$F = (F_{\delta 0} + F_{\delta d}) / \sigma_{p0}, \quad (22)$$

где  $F_{\delta 0} = 2 \cdot \delta_0 \cdot B_n / \mu_0$  – МДС воздушного зазора при притянутом якоре;  $F_{\delta d} = \delta_d \cdot B_n / \mu_0$  – МДС воздушного зазора под цилиндрической частью наружного полюса;  $\sigma_{p0} = 2 \div 2,5$  – коэффициент, учитывающий рассеяние магнитного потока обмотки.

По величине  $F$ , вычисляем значение тока  $i$  и сечение провода  $S_{np}$ :

$$i = F/W; \quad S_{np} = i/j. \quad (23)$$

Тогда предварительное значение диаметра провода обмотки можно определить по формуле

$$d'_{np} = \sqrt{4 \cdot S_{np} / \pi} \quad (24)$$

По величине  $d'_{np}$  выбирают ближайший стандартный провод, определяя тем самым  $d_{np.ст}$  и  $S_{np.ст}$ .

Глубина паза под обмотку

$$h = \frac{W \cdot S_{np.ст}}{b \cdot k_3}, \quad (25)$$

где  $k_3$  – коэффициент заполнения паза обмоткой.

Тогда общая высота магнитопровода будет равна

$$H = h_c + h, \quad (26)$$

Толщину добавочного полюса 5 и фланца 6 (см. рис. 2.2) определяем по допустимой индукции в них. Для этого рассчитываем магнитный поток постоянного магнита:

$$\Phi_{ПМ} = B_{ПМ} S_n. \quad (27)$$

Тогда толщина дополнительного полюса будет равна:

$$l = \Phi_{ПМ} / (\pi D_{ПМ.в} B_{доп} \sigma_p), \quad (28)$$

а толщина фланца

$$a_1 = \Phi_{ПМ} / (\pi D_3 B_{доп} \sigma_p) \quad (29)$$

Таким образом, все предварительные геометрические размеры и обмоточные данные электромагнитного привода определены.

Далее необходимо оценить работоспособность спроектированного УЭ по нагреву его обмотки. Для этого определяют потребляемую мощность, теплоотдающую поверхность и перегрев обмотки  $\Delta t^0$ .

**Уточненный расчет** заключается в определении фактических магнитных параметров постоянного магнита, которые он имеет при различном положении якоря относительно магнитопровода, т.е. при различных рабочих состояниях фрикционного узла. Это позволит определить реальные выходные параметры ЭММ ПМ и при необходимости провести корректировку геометрических размеров магнитопровода и постоянного магнита, а также обмоточных данных УЭ. Поскольку магнитные свойства магнитопровода нелинейны, а магнитные свойства постоянного магнита в значительной мере зависят от технологии его изготовления и конкретных условий намагничивания, то точное аналитическое решение поставленной задачи практически весьма затруднительно. Поэтому расчет выполняют по упрощенным методикам. Такие методики для инженерных расчетов вполне приемлемы, поскольку погрешность при их использовании приблизительно совпадает с точностью воспроизведения собственных свойств постоянных магнитов.

При расчетах ЭММ ПМ наиболее целесообразно применить метод отношений, используемый для постоянных магнитов, расположенных в магнитной арматуре. В соответствии с этим методом принимают, что магнитное сопротивление арматуры равно нулю, а магнитное напряжение вдоль магнита распределено линейно [8].

Для расчета рабочей точки постоянного магнита используют усредненную кривую намагничивания  $B = f(H)$  для соответствующего материала магнита. При этом

наиболее трудоемким этапом расчета является определение проводимостей, причем в этом случае, наряду с определением проводимостей рассеяния магнитопровода, необходимо учитывать и проводимости рассеяния самого постоянного магнита. Формулы для расчета соответствующих проводимостей могут быть получены по методу «вероятных путей потока» заменой действительного распределения поля приближенным упрощенным распределением [8, 9]. Таким образом, полную расчетную проводимость можно представить в виде трех составляющих:

$$\lambda = \lambda_{\delta} + \lambda_{p.m} + k_{ПМ} \lambda_{p.ПМ}, \quad (30)$$

где  $\lambda_{\delta}$ ,  $\lambda_{p.m}$  и  $\lambda_{p.ПМ}$  – проводимости воздушного зазора, рассеяния магнитопровода и рассеяния магнита;  $k_{ПМ} = 1/2 \div 2/3$  коэффициент неравномерности распределения магнитного потенциала вдоль магнита.

Значение  $\lambda$  зависит от положения якоря относительно магнитопровода. Координаты рабочей точки постоянного магнита, то есть индукции  $B_{ПМ}$  и напряженности  $H_{ПМ}$  в нейтральном сечении постоянного магнита, удобнее всего определять графически. При этом необходимо учитывать способ намагничивания магнита, который будет использоваться в процессе изготовления ЭММ ПМ. При установке магнита в магнитопровод проводимость увеличивается и становится равной  $\lambda$ , за счет чего параметры магнита изменяются, и их значения будут определяться точкой пересечения линии возврата, проведенной из начала координат под углом  $\alpha$  [11].

При изменении величины  $\lambda$  вследствие изменения положения якоря, рабочая точка магнита будет перемещаться по линии возврата и определяться точкой пересечения линии возврата и прямой, проведенной из начала координат под углом, соответствующим суммарной проводимости при соответствующем положении якоря относительно магнитопровода. Эти расчетно-графические процедуры выполняются следующим образом. На графике кривой размагничивания постоянного магнита из начала координат проводим прямую (рис. 4) под углом  $\alpha_1$  (показана кривая размагничивания ферритбариевого магнита марки 24 БА210)

$$\alpha_1 = \arctg (G_{np} \cdot m), \quad (31)$$

где  $G_{np}$  – приведенная проводимость при отсутствии якоря;  $m = m_n / m_e$  – коэффициент пропорциональности;  $m_n$  и  $m_e$  – масштабы напряженности и индукции соответственно.

Точка пересечения  $K$  указанной прямой линии с кривой размагничивания дает значение индукции и напряженности магнитного поля в нейтральном сечении магнита при отсутствии якоря.

5. Находим наклон прямой возврата  $KS$ :

$$\varphi = \arctg \left[ \frac{B_r}{H_c} (1 - K)^m \right], \quad (32)$$

где  $K = 2 \sqrt{\frac{B_r H_c}{B_0 H_0}} - \frac{B_r H_c}{B_0 H_0}$ ;  $B_r$  – остаточная индукция;  $H_c$  – коэрцитивная сила.

На графике кривой размагничивания из начала координат проводим прямую под углом  $\alpha_2$ :

$$\alpha_2 = \arctg (G_{np.з} \cdot m), \quad (33)$$

где  $G_{np.з} = G_{об.з} \cdot \Delta_M / S_M$  – приведенное значение проводимости при замкнутом тормозе.

Точка пересечения  $L$  этой прямой линии с прямой возврата дает значение индукции  $B_з$  и напряженности  $H_з$  магнитного поля в нейтральном сечении магнита при замкнутом тормозе.

Затем проводим прямую линию под углом  $\alpha_3$

$$\alpha_3 = \arctg (G_{np.раз} \cdot m). \quad (34)$$

Точка пересечения  $M$  этой линии с прямой возврата дает значение индукции  $B_{раз}$

и напряженности  $H_{раз}$  при разомкнутом тормозе.

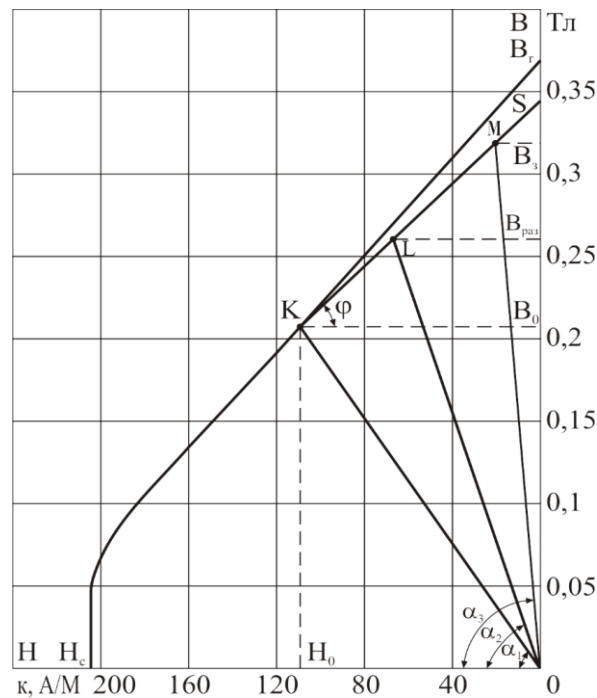


Рисунок 4 – Определение рабочих точек постоянного магнита

Определив параметры постоянного магнита, определяют выходные показатели ЭММ ПМ. Например, номинальный тормозной момент, развиваемый тормозом при замкнутом фрикционном узле, можно вычислить по выражению:

$$M_{T.ном} = (B_3^2 S_n / \mu_0 - F_{np}) k_{mp} R_{cp} \cdot \quad (35)$$

Для оценки работоспособности спроектированного тормоза необходимо решить обратную задачу расчета магнитной цепи. Для этого необходимо задаемся произвольными величинами магнитного потока  $\Phi$  и для каждого значения потока выполнить следующие расчетно-графические процедуры:

- а) рассчитать индукцию  $B = \Phi / S_n$ ;
- б) определить по кривой намагничивания величину напряженности магнитного поля в магнитопроводе  $H_m$ ;
- в) рассчитать разность магнитных потенциалов по различным путям замыкания магнитного потока:
  - по ветви, содержащей якорь и  $\delta_p$  (при разомкнутом тормозе);
  - по ветви, содержащей зазор между внутренним полюсом и цилиндрической частью наружного полюса;
  - по ветви, содержащей постоянный магнит;
  - по ветви, содержащей якорь и  $\delta_0$  (при замкнутом тормозе).
- г) графически определить магнитные потоки в зазоре между якорем и магнитопроводом, создаваемые обмоткой при рабочем токе при двух положениях якоря – при  $\delta = \delta_p$  и  $\delta = \delta_0$ .

После этого можно объективно определить рабочие параметры тормоза и оценить его работоспособность. Если значения выходных показателей отличаются от требуемых по техническому заданию, то необходимо откорректировать геометрические размеры и обмоточные данные электромагнитного привода.

### **Заключение**

Разработана инженерная методика расчета электромагнитных механизмов, содержащих постоянные магниты, магнитный поток которых используется для создания тормозного усилия и замыкания фрикционного узла. Основой методики является расчет параметров возвратной пружины, учитывающий целый ряд технологических и эксплуатационных причин разброса тока управляющей обмотки в реальных условиях изготовления и эксплуатации ЭММ ПМ. Предложенный алгоритм двухступенчатого расчета позволяет проектировать ЭММ ПМ с заданными параметрами и гарантированной надежностью работы.

Следует подчеркнуть, что разработанная методика расчета применима не только для расчета ЭММ ПМ, работающих в режиме фрикционного управляемого тормоза, но и для целого ряда других устройств, например, электромагнитных муфт, регулирующих устройств в виде электромагнитных клапанов, блокирующих устройств, станочных приспособлений различных типов, в которых используются постоянные магниты в качестве крепежных средств для обрабатываемых деталей и т.д.

### ***Литература***

1. Шишмарев В. Ю. Типовые элементы систем автоматического управления. – М.: Академия, 2004. – 304 с.
2. Михеев В. П., Выжимов В. И. Исполнительные устройства автоматических систем. – М., МИФИ, 2008. – 332 с.
3. Бочкарев И. В., Галбаев Ж. Т. Исследование надежности фрикционных электромагнитных устройств для систем автоматизации // Проблемы автоматизации и управления. 2008. – С. 180–186.
4. Бочкарев И. В. Разработка электромеханических тормозов с постоянными магнитами с улучшенными удельными показателями // Электротехника, 1998, №4. – С. 37 – 39.
5. Бочкарев И. В., Галбаев Ж. Т. Разработка и исследование устройства контроля состояния фрикционных электромеханических устройств с постоянными магнитами // Проблемы автоматизации и управления. – 2015, № 1 (28). – С.237–242.
6. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
7. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учеб. для вузов. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.
8. Арнольд Р. Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. М.: Энергия. 1969. – 184 с.
9. Постоянные магниты: Справочник / Альтман А. Б., Герберг А. Н., Гладышев П. А. и др.; Под ред. Ю. М. Пятина. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
10. Константинов О. Я. Магнитная технологическая оснастка. – Л.: Машиностроение, 1974. – 384 с.
11. Сливинская А. Г. Электромагниты и постоянные магниты. – М.: Энергия, 1972. – 248 с.

## КЫСКАЧА МАЗМУНУ

### **БИШКЕК ШААРЫНЫН АТМОСФЕРАЛЫК АБАСЫНДА PM2.5 БӨЛҮК-ЧӨЛӨРҮНҮН ТОПТОЛУУСУН МЕТЕОЛОГИЯЛЫК ФАКТОРЛОРДУ РЕГРЕССИЯЛЫК ТАЛДОО / Н.М.Лыченко**

Эмгекте Бишкек шаарында 2019-жылдын 9-февралынан тартып, 25-ноябрга чейин абанын PM2.5 бөлүкчөлөрү менен булгануусунун регрессиялык талдоонун жана метеорологиялык көрсөткүчтөрдүн, анын ичинде шамалдын ылдамдыгы, температура, абанын салыштырмалуу нымдуулугу, шүүдүрүмдүн температурасы, жаан-чачындын ыргаалдуулугу жана атмосфералык басымдуулуктун жыйынтыктары берилген. Изилдөө PM2.5 бөлүкчөлөрдүн топтолуусуна метеокөрсөткүчтөрдүн таасирин аныктоо жана бул маалыматты андан кийин божомолдоонун моделдерин иштеп чыгуу максатында жүргүзүлгөн.

*Негизги сөздөр:* корреляциялар, регрессиялык талдоо, метеорологиялык көрсөткүч, PM2.5 топтолуусу

### **БИШКЕК ШААРЫНДАГЫ МЕТЕОРОЛОГИЯЛЫК КӨРСӨТКҮЧТӨРДҮ ЭСКЕ АЛУУ МЕНЕН МУЛЬТИРЕГРЕССИЯЛЫК ЖАНА ЖАЛПЫЛОО-РЕГРЕССИЯЛЫК НЕЙРОТАРМАКТЫК МОДЕЛДЕРДИН БУЛГООНУН PM2.5 КЫСКАМӨӨНӨТТҮҮ БОЖОМОЛДООСУ / Л.И.Великанова, Н.М.Лыченко**

Бишкек ш. жайкы убакта сызыктык мултирегрессиялык жана жалпылоо-регрессиялык нейротармактык моделдин (GRNN) жана метеорологиялык көрсөткүчтөрдүн негизинде атмосфералык абасынын PM2.5 бөлүкчөлөрү менен булгануу божомолунун модердери иштелип чыккан. Нейротармактык моделди иштеп чыгууда ченөөнүн мөөнөтү боюнча алгачкы маалыматты топ-топ боюнча түркүмдөө сунушталган. Мунун негизинде мултирегрессиялык моделге салыштырмалуу божолдоонун катасын азайтууга мүмкүндүк берген.

*Негизги сөздөр:* PM 2.5 бөлүкчөлөрүнүн топтолуунун божомолу, мултирегрессиялык моделдер, GRNN жалпылоо-регрессиялык нейрон тармагы, божомолдонун катасы.

### **БУЛУТ МААЛЫМАТ-ЧЕНӨӨ ТҮЗҮМҮНҮН КОМПОНЕНТИН КӨЗӨМӨЛДӨӨ ЖАНА ӨНДҮРҮМДҮҮЛҮГҮН БААЛООНУН ЫКМАЛАРЫ / В. Гайдамако**

Макалада өндүрүмдүүлүктү иш жүзүнө ашыруунун багыттары жана ыкмалары, жана булут тармагынын өндүрүмдүүлүк компонентти баалоо каралган. Ошону менен бирге тиркемелердин өндүрүмдүүлүгүнүн көзөмөлдөө, булут тиркемелердин жана тармагынын, өзүнчө компоненттердин ыкмалары каралаган. Өндүрүмдүүлүктүн кеңири таралган көрсөткүчтөрү берилип, математикалык жана сымалдаштыруу моделдөөнүн негизинде аналитикалык баалоо ыкмалары, өндүрүмдүүлүктү баалоонун ыкмалары сүрөттөлгөн.

*Негизги сөздөр:* булуттагы маалымат-ченөө тутумдары, мониторинг, тиркемелерди көзөмөлдөө, тармактардын көзөмөлдөө, инфратүзүмдү көзөмөлдөө, өндүрүмдүүлүктү баалоо, аналитикалык баалоо, сымалдаштыруулук моделдөө.

### **КОНТЕЙНЕРЛЕРДИН ЖАРДАМЫ МЕНЕН ВИРТУАЛДЫК БИЛДИРГИЧТЕРДИН ПРОГРАММАЛЫК ЭЛЕМЕНТТЕРИН ИШТЕП ЧЫГУУ / Д.Авельцов**

Макалада docker-контейнерлерди колдонуу менен, тармагынын виртуалдык билдиргичтердин ыкмалары булуттун кардарлары катары билдиргичтерди сунуштоо, ошондой эле docker жана аларды колдонуунун мисалдары сүрөттөлөт. Docker образдарды жаратуу жана виртуалдык билдиргичти орнотуунун мисалдары берилген.



Негизги сөздөр: Билдиргичтерди виртуализациялоо, docker, docker-контейнер, Infrastructure-as-a-Service, IaaS, docker тармагы, docker-compose, docker-swarm

**БОЛЖОЛДОО ТҮЙҮНДҮК ТРАФИКТИН / Шаршеналиев Ж.Ш., Мирзакулова Ш.А., Исакова С.У.**

Заманбап гетерогендүү тармактык түзүлүш комплексин (бөлүштүрүлүшүнө) менен тармак жол жаратат. Изилдөө, чынында, маалыматтар, алар тармак түзмөктөрүн кызмат кылуу үчүн эмес, бирдиктүү катуулугу кабыл топтомдорун бар экенин көрсөтөбүз ченеди. Бул моделдин маалыматтар кийинки убакыт моменттер (убакыт сериясы) бир катар бир объектинин көрсөтөт алардын компоненттүү түзүлүшү аркылуу эмес stationarity, мүлкүн жок негизинде курулат. Маалыматтарды, анын ичинде бүгүн негизделген тармак башкаруу милдеттери. Демек, туура чечим чыгарууга, келечекти алдын ала айтууга. Комплекстүү түзүлүшү менен компоненттерин аныктоо жана сандык үчүн - тездик менен болушу / жоктугу, кокустук компонентинин мезгилдүүлүгү убакыт сериясы талдоонун негизги максаты болуп саналат. Линиялык эмес милдетин аныктоо жана ийгиликтүү болжолдодо ишке ашыруу бүгүнкү күндө терең билим менен нейрон тармагынын алгоритмдерди ишке ашырылат.

*Негизги сөздөр:* убакыттык катарлар, нейрон тармагынын, Perceptron, көп тармак, божомол

**МОБИЛЬД ҮҮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛД ЫК АЙДОЧУЛАРДЫН ЧАРЧО АБАЛЫН БААЛОО МОНИТОРИНГ СИСТЕМАСЫН ТҮЗҮҮ / Кожоголова А.К.**

Бул макала мобилдүү түзмөктөр үчүн тандап моделине негизделген чарчоону баалоо системасын түзүү мүмкүнчүлүгүн, эксперттик системасын, келечектеги системасын тиерик экспертиза негизинде акылдуу мобилдик тиркемелерди иштеп чыгуу мисалы талкууланат.

*Негизги сөздөр:* Android колдонмо, акылдуу системалар, фреймдер, мобилдик эксперт системалары, мобилдик системалар үчүн колдонмону иштеп чыгуу.

**АЙДОЧУЛАРДЫН ЧАРЧАГАН АБАЛЫН ИШТЕЛИП ЧЫККАН МОБИЛЬД ҮҮ СИСТЕМАСЫ МЕНЕН ТЕКШЕРҮҮ / Кожоголова А.К.**

Бул макалада интеллектуалдык мобилдик колдонмосун эксперттик базасында иштеп чыгуу жөнүндө мисалы келтирилген, айдоочулардын абалына баа берүү үчүн жүргүзүлгөн текшерүү тестирилөө түрлөрүн сүрөттөлүшү берилген, иштелип чыккан мобилдик колдонмо үчүн, ар кандай айдоо стажы бар респонденттердин катышуусу менен, текшерүү жүргүзүлгөн.

*Негизги сөздөр:* Android колдонмо, акылдуу системалар, фреймдер, мобилдик колдонмо системалары, сервер үчүн колдонмо.

**«КАСТИНГ» ЖЧКНЫН ПАВЛОДАР ФИЛИАЛЫНЫН МЕТАЛУРГИЯЛЫК ШЛАГЫН СТАТИСТИКАЛЫК БААЛОО УЧУН КЛАССТЕРДИК ТАЛДООНУН ЫКМАЛАРЫН КОЛДОНУУ / Арынгазин К.Ш., Акишев К.М., Карпов В.И.**

Нарын Павлодарской менен жүргүзү ССРСдин бар металлургические ишканаларын, күн сайын жүргүзгөн жүздөгөн тонна металлургия калдыктары окалины, футеровочной обшивки жана тд. Долбоордун алкагында азыркы учурда үчүн экологиялык кырдаалды жакшыртуу табышат улам көбүрөөк жайылтуу ресурс үнөмдөөчү технологиялар, аларда катары сырьелук компоненттерин пайдаланууга мүмкүн болот техногендик калдыктарын же аларды кайра иштетүүдөн, бул өнөр жай өндүрүшүнүн шарттарында берет жана олуттуу экономикалык жана ресурсосберегающий натыйжаларды. - Статьясында каралган усулдарын колдонуу кластердик талдоо үчүн статистикалык баа берүүнүн сапатын металлургия шлака ПФ ТОО "Кастинг", программалык продуктуна

колдонуу менен "Комплекстүү сапатын баалоо жана классификациялоо многомерных объекттерди" ыкмаларынын негизинде Уорда, Тамуры Менен, Евклидова аралыкка. Колдонуунун натыйжасында программалык продуктуу "Комплекстүү сапатын баалоо жана классификациялоо многомерных объекттерди" проба металлургия шлака тандалып алынган менен ар кайсы жерден шлакохранилища алынды бөлүнүшү кластеры жана алынган сапатын баалоо металлургия шлака андан ары пайдалануу үчүн курулуш материалдарына. Биз иштелип чыккан натыйжалуу рецептуру оор бетон аралашмаларын пайдалануу менен металлургиялык калдыктарды ПФ ТОО "Кастинг" талаптарына ылайык ГОСТ25192-2012

*Негизги сөздөр:* Системалык талдоо, кластердик талдоо методдору, металлургия шлактарынын сапатынын көрсөткүчтөрү, статистикалык баалоо, көп өлчөмдүү изилдөө объектиси, статистикалык ыкмалар.

### **ТЕРМЕЛҮҮ ПРОЦЕССИНИН МОДЕЛИНДЕГИ ФУНКЦИОНАЛДЫК-ДИФФЕРЕНЦИАЛДЫК ТЕНДЕМЕ / Ж.Н. Кутунаев**

Бул макалада техникалык жана инженердик илимдерде колдонулуучу чектелген шарттагы функционалдык-дифференциалдык гиперболика тибиндеги теңдеменин жекече учурда колдонулушу каралды.

*Негизги сөздөр:* гиперболика тибиндеги теңдемелер, интегралдык-дифференциалдык теңдемелер, кыл, баштапкы жана чектелген шарттар, термелүү процесстери, математикалык моделдөө, туурасынан термелүү.

### **НЕРВДИК БУЛАДАГЫ ПОТЕНЦИАЛДЫН ТАРКАЛУУСУНУН ЭКИЛИК ТҮЗ МАСЕЛЕСИНИН САН УСУЛДУК ЧЕЧИМИ / А.Дж. Сатыбаев, Г.С. Курманалиева**

Бул макалада нервдик буладагы потенциал кыймыл аракетинин таркалуусунан пайда болгон экилик түз маселеси каралган. Бул учурда параболик типтеги маселе пайда болот жана аны Лапластын котормолоочусунун негизинде гиперболикалык типтеги маселеге келтирилгет, ал эми ал маселе потенциал аракет кыймылынын таркалуусунун ылдамдыгын эске алат.

Гиперболикалык типтеги маселеге ченем айрымалык усулу колдонуу менен анын сандык алгоритми тургузулган. Алынган жакындаштырылган чечими так чечимине умтулуусунун теоремасы далилденген.

Гиперболикалык жана параболикалык маселелердин эквивалентүүлүгүнөн параболикалык маселенин ченем айрымалык чечими да анын так чечимине умтулат.

*Негизги сөздөр.* Экилик, түз маселе, нервдик була, потенциал аракет кыймылы, параболикалык маселе, гиперболикалык маселе, Лаплас котормолоочусу, ченем айрымалык усул, сандык алгоритм, жакындаштырылган чечим, чечимдин умтулуусу.

### **КОМПЬЮТЕРДИК МОДЕЛДӨӨНҮН ЖЫЙЫНТЫКТАРЫ БОЮНЧА ЖАҢЫ ТИПТЕГИ МИКРОГЭСТИН ПАРАМЕТРЛЕРИН АНЫКТОО / А.Б. Бакасова, Т.К. Сатаркулов, Г.Н. Ниязова**

Жаңы типтеги микроГЭСтин патенттелген үч вариантынын баяндамалары берилди. Алардын айырмачылыктары автоматтык түрдө массасын жана инерция моментин жөнгө салып туруучу маховиктин (АРМИ) конструкциясынын өзгөчөлүгүндө. МикроГЭСтин параметрлери берилген математикалык модели боюнча жасалган компьютердик моделдөөнүн жыйынтыктары каралды. MatLab/Simulink программаларынын пакеттеринин жардамы менен ишке ашкан компьютердик моделдөөнүн жыйынтыктарынын негизинде микроГЭСтин параметрлерин аныктоо боюнча сунуштар берилди.

*Негизги сөздөр:* микроГЭС, маховик, моделдөө, гидротурбина, айлануу жыштыгын турукташтыруу, Уаттанын жөнгө салгычы, MatLab/Simulink.

**КОМПЬЮТЕРДИК МОДЕЛДӨӨНҮН НЕГИЗИНДЕ ЭЛЕКТР ТАРМАКТАРЫНДАГЫ ЭЛЕМЕНТТЕРДИН КУБАТТУУЛУКТУН ЖОГОТУУСУН ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯНЫН САПАТЫНЫН ТААСИРИ АРКЫЛУУ БАА БЕРҮҮ / Бузурманкулова, Ч.К., Кадиева А.К., Исакеева Э.Б., Дюшеева Ч.М., Абдыбаева Ж.К., Узагалиев З.А.**

Электр тармактардагы элементтеринде кубаттуулуктун жоготуусуна электр энергиясынын сапатынын таасирин баалоо үчүн MatLab/SimPowerSystems/Simulink топтом программасы колдонулган. Бул топтомдор ар кандай татаалдыктагы системасынын моделдерин куруу үчүн зарыл болгон атайын даярдалган блоктордон турат, бирок кээде талап ылайык колдонуучу түзмөк модели жок болушу мүмкүн, анда аларды Simulink жана SPS блокторунун негизинде түзүшү мүмкүн.

Бул жумушта сызыктуу эмес каршылыктын жана индуктивтуулуктун тийгизген таасирине таасирин баалоодо электр тармактарында электр энергиясынын сапатына, кубаттуулуктун жоготуусуна баа берүү үчүн үчүн компьютердик моделдөөнүн натыйжалары көрсөтүлгөн.

*Негизги сөздөр:* моделдөө, электр тармактарындагы элементтердин кубаттуулуктунун жоготуусуна болгон электр энергиянын сапатынын таасири, MATLAB/SimPowerSystems / Simulink.

**КИНЕМАТИКАЛЫК СУУ АГЫМЫНЫН МҮНӨЗДӨМӨЛӨРҮНҮН ЭКИ ЧЕКТЕШ ӨЛЧӨГҮЧ ЧЕКИТТЕРДЕ ӨЛЧӨНҮҮЧҮ БИРИ-БИРИНЕН "КӨЗ КАРАНДЫСЫЗДЫК АРАЛЫГЫН" АНЫКТОО МЕТОДУ / К.А. Пресняков, Г.К. Керимкулова, Г.О. Аскалиева, Е.Ю. Першакова**

Кинематикалык суу агымынын мүнөздөмөлөрүнүн эки чектеш өлчөгүч чекиттерде өлчөнүүчү бири-биринен "көз карандысыздык аралыгын" аныктоо методу сунушталды. Көрсөтүлгөн "көз карандысыздык аралыгынын" сунушталган маанилери же аралашуу жолунун узундугуна, же турбуленттик тике масштабына, же аны бойлото өлчөнүүчү мүнөздөгүчтөрдүн ортосундагы корреляция коэффициенти бирден нөлгө чейин өзгөрүүчү "көз карандысыздык аралыгынын" эмпирикалык маанисине негизделди. Маанилердин көрсөтүлгөн варианттарын талдоонун негизинде аларды колдонуу областарын аныктоо мүмкүн.

*Негизги сөздөр:* аралашуу жолу, узата компонентасы, тигинен компонентасы, ылдамдык, көз карандысыздык аралык, турбуленттик, корреляция.

**ТАТААЛ ТЕРМЕЛҮҮЛӨРДҮ БАШКАРУУ ТЕОРИЯСЫНДА ЭНЕРГЕТИКАЛЫК ИНВАРИАНТТАРДЫ КОЛДОНУУГА НЕГИЗДЕЛГЕН ЖАҢЫ ЫКМА ЖӨНҮНДӨ / Ж. Ш. Шаршеналиев, А.Б. Бакасова**

Макалада моделдик объект үчүн, башкаруунун синергетикалык теориясынын термелүүлөрдүн жөнөкөйлөтүлгөн регуляторун аналитикалык конструкциялоого арналган (ТЖРАК) жаңы ыкманын колдонулушу мисал катары сүрөттөлгөн. Бул ыкманын өзгөчөлүгү - синтезделүүчү системанын энергиясы түрүндө алынуучу энергетикалык инварианттын же системанын кыймылынын биринчи интегралынын негизинде, инварианттык ар түрдүүлүктү бир тектүү кылып тандоо болуп саналат, демек бул ыкма татаал регулярдик жана баш-аламан термелүүлөрдү башкаруунун кеңири маселелерин чечип берет. ТЖРАК ыкмасынын артыкчылыгы - башкаруунун закондорун аналитикалык түрдө алуу болуп саналат.

*Негизги сөздөр:* башкаруунун синергетикалык теориясы, синтез, энергетикалык инварианттар, татаал термелүүлөр, термелүүлөрдүн жөнөкөйлөтүлгөн регуляторун аналитикалык конструкциялоо (ТЖРАК)

**БИЙИК ТООЛУ АЙМАКТАРДА ЖОГОРКУ ЧЫНАЛУУДАГЫ ЭЛЕКТР ӨТКӨРҮҮЧҮ АБА ЧУБАЛГЫЛАРДА КОРОНАДАН ЖОГОТУУЛАРДЫН МОДЕЛЬДИК КӨРҮНҮШҮ / Айдарова А. Р.**

Бийик тоолу аймактык шарттарда электр өткөрүүчү аба чубалгыларда жогорку чыңалууда коронадан жоготуулардын үлгү сунуштамасы каралган. Бийик тоолу аймактык шарттарда электр өткөрүүчү чубалгылар (ЛЭП) үчүн ар кандай кесилиштеги зымдардагы кубаттуулуктун жоготуулары коронага методикалар боюнча эсептөөлөрдүн жыйынтыгы менен дал кебестиги, аба чубалгылардагы короналардан болгон жоготууларынын анализине багытталган илимий жарыялардын негизинде белгиленип көрсөтүлгөн. Бул жерден, коронадан болгон жоготууларга таасир берүүчү кошумча факторлорду такташ үчүн кошумча изилдөөлөр талап кыланарын белгилеп кетүү зарыл. Мындай кошумча факторлор жөнүндө автордук сунуштар жүргүзүлөт.

*Негизги сөздөр:* коронадан жоготуулар, бийик тоолу аймактык электр өткөрүүчү аба чубалгылар, электр талаанын чыңалуусу, аба-ырайынын шарттары, каар катмары, диэлектрикалык өткөрүмү.

**ТАТААЛ ЭЛЕКТРЭНЕРГЕТИКАЛЫК СИСТЕМАСЫНЫН ЭНЕРГЕТИКАЛЫК ОБЪЕКТТЕРИН КӨЗӨМӨЛДӨӨ ЖАНА ДИАГНОСТИКАЛОО: АБАЛЫ ЖАНА КӨЙГӨЙЛӨРҮ / Н.Т. Ниязов Г.Н.Ниязова**

Макалада татаал электрэнергетикалык системаларды жана энергетикалык объекттерди көзөмөлдөө менен диагностикалоонун бүгүнкү абалын жана көйгөйлөрүн талдоо берилди. Объекттердин абалын диагностикалоо жагынан караганда, стандарттуу эмес режимге туш болгон татаал объекттерге мүнөздүү өзгөчөлүктөр каралды.

*Негизги сөздөр:* электрэнергетикалык система, энергетикалык объект, стандарттуу эмес режим, диагностика, техникалык абалды көзөмөлдөө

**АВТОНОМДУУ БӨЛҮШТҮРҮЛГӨН ЭНЕРГОКОМПЛЕКСТЕРДИ ЖАНА АНДАГЫ ЭНЕРГЕТИКАЛЫК БАЛАНСТЫ БАШКАРУУНУ ДОЛБООРЛОО ЫКМАСЫНЫН ЖАЛПЫЛАШТЫРЫЛГАН СХЕМАСЫ / Асанова С.М., Арфан аль Хакам, Жабудаев Т.Ж., Сатаркулов Т.К., Тиленбаев И.Н., Усубалиева Г.К.**

Автономдуу бөлүштүрүлгөн гибрирдүү энергокомплекстерди (АБГЭК) автоматташтырылган долбоорлоонун универсалдуу системасын түзүү ыкмасы жана андагы энергетикалык балансты, башкача айтканда, бул системада айлана турган кубаттуулук агымдарын башкаруу ыкмасы иштелип жатат. АБГЭКти долбоорлоо ыкмасынын жалпылаштырылган схемасы төмөнкүдөй баскычтардан турат: керектөөчүлөрдүн электр жүктөмдөрү тууралуу, каралып жаткан аймактагы шамалдын ылдамдыгы тууралуу, тоолордогу жана түздүктөгү өзөндөрдүн суу энергетикалык ресурстары тууралуу, күн энергиясы тууралуу изилдөө жүргүзүү жана статистикалык база түзүү, ошондой эле шамал энергиясын жана суу энергиясын электр энергиясына айландыруучулар тууралуу изилдөө жана маалымат базасын түзүү. Энергияга айлануучу кубаттуулуктун талап кылынган денгээлин жана минималдуу наркын камсыз кыла турган энергия жаратуунун бөлүштүрүлгөн гибрирдүү системасынын оптималдуу түзүмүн синтез кылуу милдети каралып жатат.

*Негизги сөздөр:* энергиянын кайра калыптанма булактары; автономдуу бөлүштүрүлгөн гибрирдүү энергокомплекс; энергетикалык баланс; башкаруу системасы; оптималдуу түзүмдү синтез кылуу; багыт алган граф.

**АВТОМАТИКА СИСТЕМИ УЧУН УЮЛДАШКАН ЭЛЕКТРОМАГНИТТИК МЕХАНИЗМДЕРДИН ЭСЕПТОО МЕТОДИКАСЫН ИШТЕП ЧЫГУУ / И.В. Бочкарев, М.Г. Гунина, Д.Н. Садыков, Б.К. Мусабеков**

Турактуу магниттерди камтыган, Магниттик агымы тормоздоочу кучту пайда кылууга

жана фрикциондук туйунду туташтырууга колдонулган, электромагниттик механиздердин эсептоо методикасы сунушталды. Бул методика оромдун башкаруучу тогунун чондуктарын ар турдуулугун эске алган, турактуу магниттин параметрлеринин технологиялык ар турдуулугу жана магнитоткоргучтун олчомдору, тармактын чыналуусунун туруксуздугу, андан тышкары оромдун ысышы менен каршылыгынын озгоруусу менен шарталган кайтаруучу серпилгичтин параметрлерин эсептоону камтыйт. Корсотулгондой, электромагниттик кыймылга келтиргичти эсептоодо башкаруучу электромагниттин бутакталган магнит чынжыры эсептелинет жана болунуп эки маселе чечилет: еректүү болгон магнит индукциясын тузуу учун магниткыймылдаткыч кучун (МКК) эсептоо маселеси (синтез маселеси же «туз» маселе), жана МККнын белгилуу маанилеринде, магнит чынжырынын ар кандай болукторунон аккан магнит агымын эсептоо маселеси (анализдоо маселеси же «тескери» маселе). Ошол себептен, эсептоо эки болукко болунгон – издоо эсептоосу, алдын ала магнитоткоргучтун олчомдорун аныктоо учун жана тактоочу эсептоо, турактуу магниттин параметрлерин аныктоо жана геометриялык олчомдорун жана оромдун чондуктарын тураалоо учун.

*Негизги создор:* турактуу магниттуу электромагниттик механизм, фрикциондук туйун, башкаруучу электромагнит, якорь, кайтаруучу серпилгич, тормоздук момент.

ABSTRAKT

**REGRESSION ANALYSIS OF METEOROLOGICAL FACTORS AND CONCENTRATIONS OF PM2.5 IN ATMOSPHERIC AIR OF BISHKEK CITY / N.M. Lychenko**

The paper presents the results of a regression analysis of air pollution concentrations by PM2.5 particles and meteorological data such as wind speed, temperature, relative air humidity, dew point temperature, precipitation intensity and atmospheric pressure for the Bishkek city from February 9 to November 25, 2019. The study was conducted in order to identify the influence of meteorological parameters on the concentration values of PM2.5 and to further use this information to build forecast models.

*Keywords:* correlations, regression analysis, meteorological parameters, PM2.5 concentrations.

**MULTIREGRESSION AND GRNN- NETWORK MODELS USING METEOROLOGICAL PARAMETERS FOR SHORT-TERM FORECAST OF PM2.5 POLLUTION IN BISHKEK / L.I. Velikanova, N.M. Lychenko**

Linear multi-regression model and the generalized regression neural network model (GRNN) using meteorological parameters for the short-term forecast of PM2.5 pollution in Bishkek for the summer period have been developed. It was proposed to decompose the initial data according to the measurement times in order to develop the neural network model. This allowed us to reduce the forecast error in comparison with the multi-regression model.

*Keywords:* PM2.5 concentration prediction, multi-regression models, generalized regression neural network GRNN, forecast error.

**OVERVIEW OF MONITORING METHODS AND PERFORMANCE ASSESSMENT COMPONENTS OF THE CLOUDING INFORMATION-MEASURING SYSTEM / V. Gaydamako**

The article discusses the directions and methods of monitoring and performance evaluation of the cloud environment components. In particular, methods for monitoring the performance of applications, cloud infrastructure and network, individual components are considered. Common performance indicators are given, methods for performance evaluation based on measurements, analytical evaluation methods based on mathematical or simulation modeling are described.

*Keywords:* cloud information-measuring systems, monitoring, applications monitoring, network monitoring, infrastructure monitoring, performance evaluation, analytical assessment, simulation

**DEVELOPMENT OF VIRTUAL SENSORS SOFTWARE ELEMENTS USING CONTAINERS / D. Aveltsov**

This article describes methods of sensor virtualization using docker containers to provide sensors as a service to cloud customers, as well as docker networks and examples of their use. Examples of creating docker images and containers with virtual sensor installation are presented.

*Keywords:* Sensor virtualization, docker, docker container, Infrastructure-as-a-Service, IaaS, docker networks, docker-compose, docker-swarm

**NETWORK TRAFFIC FORECASTING / Sharshenaliev Zh. Sh., Mirzakulova Sh. A., Isakova S. U.**

A modern heterogeneous network generates network traffic with a complex (heterogeneous) structure. A study of the actually measured data shows that they do not have a uniform intensity of packet arrival to serving network devices. Moreover, models built on the basis of data characterizing one object for a series of consecutive moments of time (time series) have the non-stationary property, which means that their structure is multicomponent. Therefore, today network management tasks are based, among other things, on predicted future data to

make the right decision. To identify and quantify the components of a complex structure - the presence / absence of a trend, periodicity, random component is the main task of the analysis of the time series. To identify a nonlinear function and carry out its forecasting, neural network algorithms with deep learning are very successfully implemented today.

*Keywords:* time series, neural network, perceptron, multilayer network, forecast

**DEVELOPMENT OF MOBILE INTELLIGENT SYSTEM FOR MONITORING THE STATE OF FATIGUE OF THE DRIVER / A.K.Kozhogulova**

The article discusses the possibilities of creating a fatigue assessment system based on the selected model for mobile devices, provides an example of the development of an intelligent mobile application based on an expert system, and presents a prototype user interface for the future system.

*Keywords:* Android application, intelligence systems, frames, mobile expert systems, application development for a mobile system.

**TESTING OF THE DRIVERS ON BASIS OF THE DEVELOPED MOBILE APPLICATION OF FATIGUE ASSESSMENT / Kozhogulova A.K.**

The article provides an example of the development of an intelligent mobile application based on an expert system, describes the types of testing to assess the condition of drivers, conducted a trial test of the developed application with the participation of respondents of different driving experience.

*Keywords:* Android application, intelligent systems, mobile system applications. server-application, data transfer Protocol, application testing.

**STATISTICAL ASSESMENT OF THE QUALITY OF METALLURGICAL SLAG OF PAVLODAR BRANCH LLP «CASTING» WITH APPLICATION OF METHODS OF THE CLASTER ANALYSIS / K.Sh.Aringazin, K.M. Akishev, V.I.Karpov**

In the Pavlodar region since the Soviet Union, there are metallurgical enterprises that produce hundreds of tons of metallurgical waste, scale, lining, and so on every day. Within the framework of the project, at present, to improve the ecological situation, resource-saving technologies are found in which technogenic waste or products of their processing can be used as raw materials, which in the conditions of industrial production gives significant economic and resource-saving effects. The article discusses the application of cluster analysis methods for statistical assessment of the quality of metallurgical slag of PF Casting LLP, using the software package “Complex quality assessment and classification of multidimensional objects” based on the methods of Ward, Tamura S, Euclidean distance. As a result of the use of the “Comprehensive Quality Assessment and Classification of Multidimensional Objects” software product, metallurgical slag samples taken from different points of the slag storage were divided into clusters and a metallurgical slag quality assessment was obtained for further use in building materials. We have developed effective formulations of heavy concrete mixtures using metallurgical wastes of the PF Casting LLP that meet the requirements of GOST25192-2012.

*Keyword:* System analysis, cluster analysis methods, metallurgical slag quality indicators, statistical evaluation, multidimensional object of study, statistical methods.

**THE APPROACHED DECISION R. BELLMAN'S EQUATION IN OPTIMAL CONTROL PROBLEMS TECHNOLOGICAL PROCESSES OF HEATING / DJ.SH. Sharshenaliyev, T.P. Samokhvalova**

The new way of construction of the approached feedback control, based on a method of characteristics of N. Gjunter and a method of additional argument is offered. The automated feedback in a method of a principle of maximum of L. Pontrjagin is constructed.

*Keywords:* optimal control; feedback; R. Bellman's dynamic programming; a principle of a maximum of L. Pontrjagin; a method of characteristics and additional argument; high-temperature heating; jumps of value of control.

**FUNCTIONALLY-DIFFERENTIAL EQUATION IN THE MODEL OF THE OSCILLATORY PROCESS / J.N. Kutunaev,**

The article considers an equation of hyperbolic type with functional-differential boundary conditions, particular cases of which are many other equations found in applied technical and engineering sciences.

*Keywords:* hyperbolic type equation, integro - differential equation, strings, initial and boundary conditions, oscillatory processes, mathematical modeling, transverse vibrations

**NUMERICAL ALGORITHM OF THE TWO-DIMENSIONAL DIRECT PROBLEM FROM THE SPREAD OF ACTION POTENTIAL ALONG THE NERVE FIBER / A.Dj. Satybaev, G.S. Kurmanalieva**

This article presents a two-dimensional direct problem arising from the spread of action potential along the nerve fiber. In this case, a problem of parabolic type arises, and with the using of the Laplace transform the last problem is reduced to a problem of hyperbolic type, which takes into account the propagation speed of the action potential. We construct a numerical solution algorithm using the finite-difference method of a hyperbolic type problem. A theorem on the convergence of the constructed approximate solution to the exact solution is proved. Since the hyperbolic and parabolic problems are equivalent, the finite-difference solution of the parabolic problem also converges to the exact solution.

*Keywords.* Two-dimensional direct problem, nerve fiber, action potential, parabolic problem, hyperbolic problem, Laplace transform, finite difference method, numerical algorithm, approximate solution, solution convergence.

**DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF A NEW TYPE OF SMALL HYDRO-ELECTRIC STATION BASED ON THE RESULTS OF COMPUTER MODELING / A.B. Bakasova, T.K. Satarkulov, G.N. Niiazova**

Descriptions of the three patented small hydro-electric stations of a new type are provided. The difference in them is the design of the flywheel with automatically controlled mass and moment of inertia (ACMI). The results of computer simulation (CS) of small hydro-electric stations are considered for given parameters of the mathematical model. Recommendations on determining the parameters of small hydro-electric stations are given based on the obtained results of computer simulation, carried out using MatLab/Simulink software packages.

*Keywords:* small hydro-electric station, flywheel, simulation, hydraulic turbine, rotation frequency stabilization, Watt's governor, MatLab/Simulink.

**ASSESSMENT OF THE IMPACT OF ELECTRICITY QUALITY ON POWER LOSS IN THE ELEMENTS OF THE ELECTRIC SYSTEM BASED ON COMPUTER SIMULATION // Buzurmankulova CH. M., Kadiyeva A.K., Isakeeva E.B., Duisheeva CH. K., Aabybaeva J.K, Uzagaliev Z.A.**

For assessment the impact of electricity quality on power in elements of the electric system used, software package MatLab/SimPowerSystems/Simulink. These packages have numerous libraries of ready-made blocks, necessary for building device models of any complexity, but sometimes the device model required by the user may not be available, then it can be created block based Simulink and blocks of SPS. In this work is presented the results of computer simulation for assessments the impact of nonlinear resistor and resistor inductance for the quality of electricity in electric system, power loss and energy in it.

*Keywords:* modeling, impact of electricity quality on power loss in the elements of the electric system, MatLab/SimPowerSystems/Simulink.

**METHOD FOR DETERMINING THE “INDEPENDENCE DISTANCE” OF THE KINEMATIC CHARACTERISTICS OF WATER FLOW FROM OTHER MEASURED AT TWO NEIGHBORING MEASURING POINTS / K.A. Presnyakov, G.K. Kerimkulova, G.O. Askalieva, E.Yu. Pershakova**



A method is proposed for determining the “independence distance” of the kinematic characteristics of the water flow from each other, measured at two neighboring measuring points. The proposed values of the indicated “independence distance” are based on either the length of the mixing path or the transverse scale of turbulence, or on the empirical value of the “independence distance” along which the correlation coefficient between the measured characteristics varies from one to zero. As a result of the analysis of these variants of values, it is possible to establish their area of applicability.

*Keywords:* displacement path, longitudinal component, vertical component, speed, independence distance, turbulence, correlation.

**ON A NEW APPROACH TO THE USE OF ENERGY INVARIANTS IN THE THEORY OF NONLINEAR OSCILLATIONS CONTROL / Zh.Sh. Sharshenaliyev, A.B. Bakasova**

The work illustrates the application of a new method of analytical construction of aggregated oscillation regulators (ACAOR) of synergetic control theory on a model control object. A distinctive feature of this approach is a uniform choice of invariant manifolds (IM) on the basis of energy invariants in the form of the energy of the synthesized system or its first integrals of motion, which allows to solve an extensive class of problems of control of nonlinear regular and chaotic oscillations. The advantage of ACAOR method is the receipt of control laws in an analytical form.

*Keywords:* synergetic control theory, synthesis, energy invariants, nonlinear oscillations, ACAOR method (analytical construction of aggregated oscillation regulators)

**MODEL REPRESENTATION OF CROWN LOSSES IN HIGH-VOLTAGE ELECTRIC TRANSMISSION AIR LINES IN HIGH ALTITUDE CONDITIONS / Aidarova A. R.**

A model representation of the losses from the corona in high-voltage overhead power transmission lines in high altitude conditions is considered. Based on a review of scientific publications devoted to the analysis of corona losses in overhead lines, it was noted that the values of the coronal losses of power losses per corona for different sections of the wires do not coincide with the results of calculations by the method for high-altitude power lines. It follows that additional studies are required to clarify additional factors affecting crown loss. Author's ideas about such additional factors are presented.

*Keywords:* losses from the corona, overhead power lines in high altitude conditions, electric field strength, weather conditions, snow cover, dielectric constant.

**CONTROL AND DIAGNOSTICS OF POWER FACILITIES OF COMPLEX ELECTRIC POWER SYSTEM: STATE AND PROBLEMS / N.T. Niiazov, G.N.Niiazova**

The article provides an analysis of the current state and problems of monitoring and diagnostics of complex electric power systems and power facilities. The characteristic features of complex power facilities in emergency modes from the point of view of diagnosing their condition are considered.

*Keywords:* electric power system, power facility, emergency mode, diagnostics, technical condition control

**GENERALIZED SCHEME OF THE DESIGN METHODOLOGY OF AUTONOMOUS DISTRIBUTED ENERGY COMPLEXES AND MANAGEMENT OF THE ENERGY BALANCE IN THEM / S.M. Asanova, Arfan Al Hakam, T.J., Jabudaev T.K. Satarkulov, I.N. Tilenbaev, G.K.Usubaliyeva**

We are developing a methodology for creating a universal automated design system for autonomous distributed hybrid energy complexes (ADHEC) and creating a methodology for managing the energy balance in it, that is streams of power circulating in this system. The

generalized scheme of the (ADHEC) design methodology consists of the following stages: research and creation of a statistical database of electrical loads of consumers, about wind speed of the studied region, hydropower resources of mountain and plain rivers, solar energy, as well as research and creation of a knowledge base on wind energy converters and water energy into electrical energy. The problem of synthesizing the optimal structure of a distributed hybrid generation system providing the required level of generated power and minimum cost is considered.

*Keywords:* renewable energy sources; autonomous distributed hybrid power complex; energy balance; control system; synthesis of the optimal structure; oriented graph.

**DEVELOPMENT OF CALCULATION METHODS POLARIZED ELECTROMAGNETIC MECHANISMS FOR AUTOMATION SYSTEMS / I.V. Bochkarev, M. G. Gunina, D.N Sadykov., B.K. Musabekov**

A method is proposed for calculating electromagnetic mechanisms containing permanent magnets, which is used to create braking force and close the friction unit. The methodology includes the calculation of the parameters of the return spring, taking into account the spread in the current values of the control winding, due to the technological spread of the parameters of the permanent magnet and the dimensions of the magnetic circuit, instability of the mains voltage, as well as a change in the resistance of the winding due to its heating. It is shown that when calculating the electromagnetic drive, two tasks are solved in stages: the task of calculating the magnetomotive force (MMF), (synthesis task or “direct” task), and the task of calculating magnetic fluxes flowing through different sections of the magnetic circuit at known MMF values (analysis task or “inverse” problem). Accordingly, the calculation is divided into two stages: the search calculation a preliminary determination of the dimensions of the magnetic circuit and the winding data, and the specified calculation, the parameters of the permanent magnet and adjusting the geometric dimensions and winding data of the control electromagnet.

*Keywords:* electromagnetic mechanism with permanent magnets, friction assembly, control electromagnet, anchor, return spring, braking torque.

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

Научно-технический журнал

Редактор В.А.Волчанская

Компьютерная верстка В.П. Алексеева

Подписано к печати 25.11.2019 г. Формат 70/108 1/8

Печать офсетная. Объем 16,9 п.л. Тираж 200 экз.

Издательство «Илим»

720071, Бишкек, проспект Чуй, 265-а