

EISSN 1694-836X
ISSN 1694-5050

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ И АВТОМАТИКИ

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

№ 3 (42)



БИШКЕК

2021

ИМА НАН КР

ISSN 1694-5050 (печатная версия)
ISSN 1694-836X (электронная версия)

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ И АВТОМАТИКИ

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ № 3 (42)

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 24 марта 2020 г.



БИШКЕК

2021

ИМА НАН КР

П 78

Проблемы автоматизации и управления: Научно-технический журнал
/ Национальная академия наук Кыргызской Республики.–Бишкек: ИМА, 2021.– №3 (42). – 120 с.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

д.т.н., профессор Брякин Иван Васильевич ☑

Институт машиноведения и автоматизации НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ:

к.т.н. Верзунов Сергей Николаевич ☑

Институт машиноведения и автоматизации НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

д.т.н., академик РАН Евтушенко Юрий Гаврилович ☑

Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН (Москва)

д.т.н., член-кор. АЭН РФ Карандаев Александр Сергеевич ☑

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск)

д.ф.-м.н. академик НАН РК Калимолдаев Максат Нурадилович

Казахский национальный университет им. Аль-Фараби (Алматы)

д.т.н., член-кор. АЭН РФ Макаричев Юрий Александрович ☑

Самарский государственный технический университет (Самара)

д.т.н., профессор Храмшин Вадим Рифхатович ☑

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (Магнитогорск)

д.т.н., профессор Еремин Евгений Леонидович ☑

Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск)

д.т.н., профессор Лыченко Наталья Михайловна ☑

Кыргызско-Российский славянский университет (Бишкек)

д.т.н., профессор Исмаилов Бактыбек Исакович ☑

Агентство по аккредитации образовательных программ и организаций (Бишкек)

д.т.н., профессор Бочкарев Игорь Викторович ☑

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова (Бишкек)

д.т.н., профессор Галбаев Жалалидин Токтобаевич ☑

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова (Бишкек)

д.ф.-м.н., профессор Сатыбаев Абдуганы Джунусович ☑

Ошский технологический университет им. акад. М.М. Адышева (Ош)

д.т.н., профессор Бакасова Айна Бакасовна ☑

Институт машиноведения и автоматизации НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

д.т.н. Янко Дмитрий Владимирович ☑

ОАО «Кыргызтелеком» (Бишкек)

к.ф.-м.н., с.н.с. Керимкулова Гулсаат Кубатбековна ☑

Институт машиноведения и автоматизации НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

к.т.н. Аскалиева Гулзада Орозобаевна ☑

Институт машиноведения и автоматизации НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

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 машиноведения и автоматизации Национальной академии наук КР.

Телефон: +996 553 72-20-30.

E-mail: verzunov@hotmail.com

Полная электронная версия журнала: <http://imash.kg/jrn/index.php/pau>

ISSN 1694-5050, 1694-836X © Институт машиноведения и автоматизации НАН КР, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ	4
РАСШИРЕННЫЕ ВАРИАНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРО - ВЕТРЯНОЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ И АВТОМАТИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЕЕ РАБОТЫ.....	4
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТЕНДОМ «МЕХАТРОННАЯ ЛИНИЯ FESTO».....	15
КУЧ МАЙ ТРАНСФОРМАТОРЛОРУНУН КЕЛЕМТЕСИННИН ОРОМОСУНДАГЫ ЧАБЫЛУУСУНА ДИАГНОС ЖУРГУЗУУ УЧУН ТЕХНИКАЛЫК КАРАЖАТТАРДЫ ЖАНА ЫКМАЛАРДЫ ИШТЕП ЧЫГУУ	22
РАЗРАБОТКА МАЛОМОЩНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ.....	31
АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ.....	40
ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ГРУБОСТЬ СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	40
РОБАСТНОСТЬ ИНТЕРВАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ: УСТОЙЧИВОСТЬ И ЭЛЛИПСОИДНЫЕ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА	47
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	58
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПУЛЬСАЦИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ И КОМПОНЕНТ СКОРОСТИ В ОТКРЫТОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВОДЫ	58
РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОГО АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОДНОМЕРНОЙ ОБОБЩЕННОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ДЕЙСТВИЙ ПО НЕРВНОМУ ВОЛОКНУ	67
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ	76
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ СТЕНДОВ ПО ФИЗИКЕ.....	76
СИСТЕМА ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОНЛАЙН- МОНИТОРИНГА ПОДЗЕМНЫХ СИЛОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ	83
ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА В СРЕДЕ NI LABVIEW.....	95
МОДИФИКАЦИЯ КЛАССИФИКАТОРА ИНДЕКСА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА Г. БИШКЕК С УЧЕТОМ ФАКТОРА ЗАГРЯЗНЕНИЯ	101
ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДЫ LABVIEW ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ КАБЕЛЯХ С ЦЕЛЬЮ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЕГО ИЗОЛЯЦИИ	111

УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ

УДК 621.311.26

*Бакасова А.Б., Асанов М.С., Сатаркулов К.
Институт машиноведения и автоматики НАН КР*

РАСШИРЕННЫЕ ВАРИАНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРО - ВЕТРЯНОЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ И АВТОМАТИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЕЕ РАБОТЫ

Предложен новый вариант конструкции микро-ГЭС (микроэлектростанции (МЭС) малой мощности, позволяющей эксплуатировать ее для выработки электроэнергии под воздействием ветрового потока воздуха, поступающего в приводной агрегат по напорному трубопроводу от диффузора с прямолинейно сужающимися каналами. Работоспособность МЭС подтверждена результатами компьютерного моделирования. Для сглаживания перепадов давления в объеме рабочего агрегата МЭС от порывов ветрового потока предложена конструкция демпфера. В результате этого стабилизируется режим работы МЭС. Предложена новая конструкция гидроагрегата большей мощности с центробежным регулятором частоты вращения вала МЭС, а также предложен вариант работы этой МЭС в сочетании с ветровой микроэлектростанцией, работающей и от восходящего потока горячего воздуха по трубопроводу.

Ключевые слова: ветровая микроэлектростанция; демпфер для сглаживания скачка давления в трубопроводе от порыва потока воздуха; математическое и компьютерное моделирование, стабилизация режима работы микро-ГЭС.

Введение. Как известно, в последние годы наблюдается общемировая тенденция по разработке альтернативных источников энергии, одна из групп которых включает возобновляемые источники энергии, способные извлекать энергию из постоянно протекающих природных процессов, включая солнечный свет, ветер, текущую воду и т.д. Все это связано в первую очередь с экологическими проблемами использования таких энергоресурсов, как уголь, нефть и природный газ, к тому же их доступность и природные запасы для многих стран ограничены.

Потенциальные запасы топливно-энергетических ресурсов Кыргызстана достаточно высоки. Однако на сегодняшний день используется лишь малая часть энергетического потенциала страны. При этом большими ресурсами возобновляемой энергии в Кыргызстане обладает именно гидроэнергетика, а значит, получение электрической энергии за счет эффективных конструкций гидроагрегатов малой мощности (микро-ГЭС) становится актуальным. Следующим шагом может стать введение автономных микро-ГЭС в энергобаланс страны, создав распределительные сети низкого напряжения, что в свою очередь благоприятно повлияет на стабилизацию энергетического рынка, развитие экономики, обеспечение благополучных экологических условий [1].

В Институте машиноведения и автоматики (ИМА) НАН КР разработаны ряд автономных микроэлектростанций (МЭС) с новыми типами приводных агрегатов с автоматически регулируемой частотой вращения и их математические модели. В этих агрегатах автоматическое регулирование частоты вращения обусловлено использованием маховика с автоматически регулируемой массой, моментом инерции и регулированием потока энергоносителя, поступающего в агрегат.

Используя предложенный в ИМА метод анализа надежности и диагностики состояний МЭС для автономного электроснабжения, в работе [2] обосновано, что среди разработанных МЭС наиболее приемлемым по надежности функционирования является конструкция, пред-

ставленная на рис.1 *a*, однако эти устройства имеют ряд ограничений: во-первых, они ограничены по мощности, и во-вторых, используемым для выработки электроэнергии энергоносителем является только поток воды.

В данной работе поставлены задачи по устранению выше отмеченных ограничений и расширению функциональных возможностей предлагаемых электроустановок, а также корректировка их математических моделей и рассмотрение способов по стабилизации режимов их работ.

Постановка задачи №1. Корректировка конструкции микро-ГЭС (рис.1*a*) с целью расширения используемого для выработки электроэнергии энергоносителя. При этом мощности электроустановок остаются небольшими.

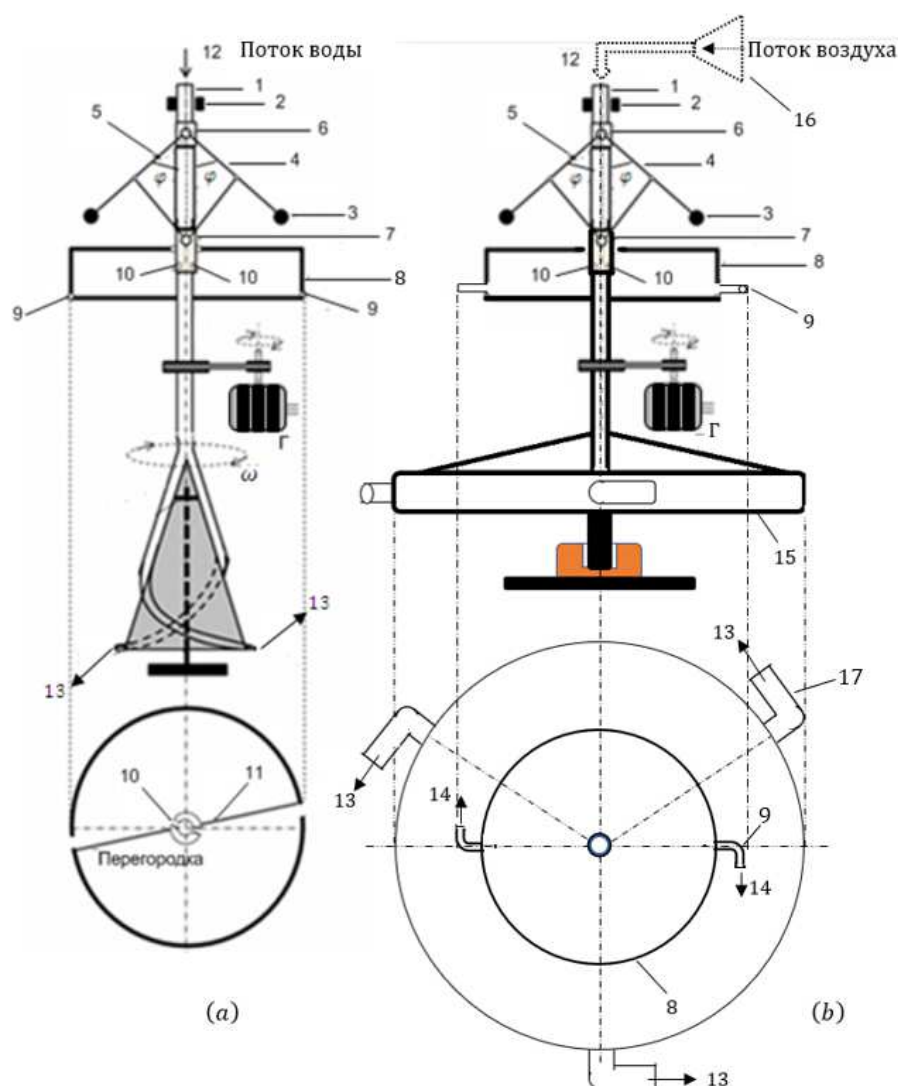


Рисунок1 – Упрощенные схемы микроэлектростанций наибольших мощностей с центробежными регуляторами (ЦР): (а) – микро-ГЭС [2], (б) – микроветроэлектростанция (МЭС)

На рис. 1*b*: 15 – ветроколесо; 16 – диффузор [4], с помощью которого ветровой поток воздуха поступает в напорный трубопровод 1; 17 – три изогнутые под девяносто градусов трубки, расположенные по периметру ветроколеса с интервалами в 120° для выброса потока воздуха 13, играющего роль реактивного сопла; Г – генератор с постоянными магнитами.

Решение задачи №1 и описание МЭС

Результаты решения поставленной задачи показаны на рис.1*b*, где МЭС может функционировать не только под воздействием потока воздуха (ветра), но и от потока воды. При этом принцип автоматической регулировки частоты вращения агрегатов сохраняется.

При сравнительном описании упрощенных схем МЭС (рис. 1*a*, *b*) будем рассматривать только функционально важные элементы.

В обеих схемах: 1 – напорный трубопровод, выполняющий функцию вертикального вала и вала центробежного регулятора, с элементами (3, 4, 5, 6, 7); 8 – полый маховик, полость которого разделена перегородкой на две части; 9 – два симметрично расположенные сквозные отверстия для выброса воды, (рис.1 *a*), а на рис. 1 *b* две изогнутые под девяносто градусов трубки для выброса потока воздуха 14, играющие роль реактивного сопла; 10 – два сквозные отверстия на участке вала, симметрично расположенные внутри полого маховика, для поступления воды в случае рис.1*a* и в случае рис. 1*b* для поступления напора воздуха; 7 – подвижная муфта, закрывающая отверстия 10 при номинальной скорости вращения гидротурбины в случае рис.1*a* и ветротурбины для рис. 1*b*; 13 – напор воды для рис.1 *a* и напор потока воздуха в случае рис. 1*b*, которые приводят во вращательное движение из-за реактивных отдач соответственно потоков воды и воздуха.

В окончательном варианте действующий макет микроветровой электростанции с диффузором с прямолинейными сужающимися каналами (рис.2) имеет следующий вид:

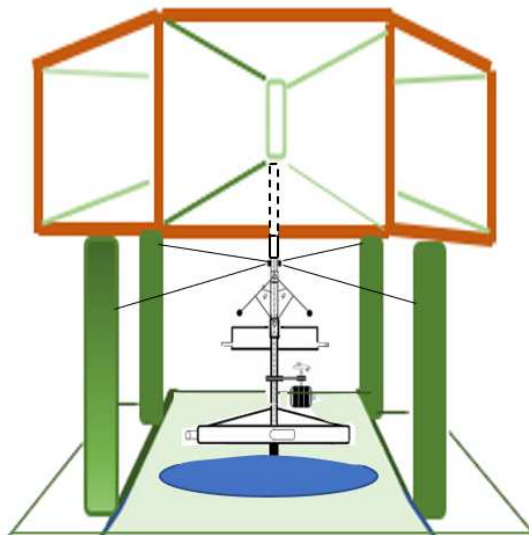


Рисунок 2 – Макет микроветровой электростанции с диффузором с прямолинейно сужающимися каналами

Алгоритм функционирования МЭС (рис.1). В рассматриваемых вариантах МЭС производства электроэнергии реализуется генераторами с постоянными магнитами, приводимыми во вращательное движение агрегатами с центробежным регулятором (ЦР). На

рис.1а функцию приводного агрегата выполняет гидротурбина, а на рис. 1б – ветровая турбина. Так как алгоритмы функционирования МЭС, представленные на рис.1, одинаковые, то рассмотрим работу только одной МЭС, показанной на рис. 1б.

Поддержание равномерного вращательного движения ветровой турбины реализуется следующим образом.

Поток ветра поступает от диффузора 16 в напорной трубопровод 1 и при выходе потока ветра 13 из сопла 17 ветроколеса 15, напорный трубопровод 1, а также жестко соединенные с ним маховик 8 и неподвижная втулка 6 приводятся во вращательное движение.

При вращении вала 1 на каждый из грузов 3 действует центробежная сила, под воздействием которой стержни 4 и 5, отклоняясь от своего вертикального положения на некоторый угол, при помощи шарниров приводят в движение муфту 7. При отклонении значения угловой скорости вращения вала от номинального (из-за изменения нагрузки генератора) происходит изменение центробежной силы, и подвижная втулка 7 приоткрывает или закрывает сквозные отверстия на вале, находящимся во внутренней области маховика, регулируя поступление воздуха в него.

При номинальной скорости вращения ветровой турбины отверстия 10 закрыты муфтой 7. При увеличении скорости вращения выше номинальной за счет уменьшения нагрузки генератора муфта 7 приоткрывает отверстия 10, и поток воздуха поступает в полости маховика. При этом в отличие от варианта МЭС, показанного на рис.1 (а), масса и момент инерции не меняются, но за то уменьшается напор потока воздуха 13 за счет спада давления в трубопроводе 1 (часть потока воздуха поступает в полость маховика и тем самым уменьшает напор на выходе 13 ветровой турбины) и к тому же поток воздуха 14, вырываясь из сопла 9, создает механический момент, направленный на торможение ветровой турбины. Все это приводит к понижению скорости вращения вала 1. Когда скорость вращения вала приближается к номинальной, муфта 7 начинает прикрывать сквозные отверстия 10, уменьшая поступление воздуха в него и увеличивая напор на выходе 13 ветровой турбины, тем самым обеспечивая поддержание равномерного вращательного движения ветровой турбины МЭС.

Для определения оптимальных параметров системы «ветровая турбина-ЦР-генератор», обеспечивающих их устойчивую работу с поддержанием номинальной частоты вращения генератора, необходима их математическая модель.

Математическая модель системы «ветровая турбина-ЦР-генератор». Математическую модель системы «ветровая турбина-ЦР-генератор» можно получить из математической модели системы «гидротурбина-ЦР-генератор», имеющей следующий вид [2]:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{d\tau} = \psi, \\ \frac{d\psi}{d\tau} = \omega^2 \sin \varphi \cos \varphi - \frac{g}{l} \sin \varphi - \frac{b}{ml} \psi, \\ \frac{d\omega}{d\tau} = \frac{k_1}{J(\varphi)} \cos \varphi - \frac{F}{J(\varphi)}, \end{cases} \quad (1)$$

где φ – угол отклонения от вертикали стержней 4, 5 ЦР; τ – время; ψ – скорость изменения φ (определена первым уравнением); ω – 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.1а);

$$F = (P_{\Gamma} - P_{\text{мех}}(\tilde{\varphi}) + k_1 \cos \tilde{\varphi}),$$

где P_Γ – момент силы, вызванный электрической нагрузкой, $P_{\text{мех}}(\tilde{\varphi})$ – составляющие момента силы $P_{\text{мех}}(\varphi)$, создаваемые реактивной отдачей напора воды 13 (рис.1а) при некотором угле ($\tilde{\varphi}$), вблизи которого меняется φ , $k_1 > 0$ коэффициент пропорциональности.

Первые два уравнения системы (1) соответствуют динамике ЦР.

Для уменьшения числа независимых параметров проведем замену переменных [5]:

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

В результате (1) примет вид

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

где

$$\begin{aligned} J(x_1) &= J_1 - k_2(\cos x_1 - M \cdot \cos \tilde{\varphi}); \\ \gamma &= b/m(gl)^{\frac{1}{2}}; \quad H = (k_1 \cdot l)/g; \\ \rho &= F/k_1; \end{aligned} \quad (3)$$

J_1 – момент инерции всех вращающихся частей, включая момент инерции не заполненного водой маховика.

Полученная система (2) относится к жестким нелинейным дифференциальным уравнениям, которая не имеет аналитического решения, поэтому для исследования его устойчивости необходимы численные исследования на компьютерной модели. Для системы уравнений (2) такая компьютерная модель разработана в [2].

Чтобы получить из аналитических выражений (2) и (3) математическую модель системы «ветровая турбина-ЦР-генератор», достаточно приравнять в выражении (3) k_2 нулю и учесть дополнительным слагаемым в правой части третьего уравнения системы (2) функцию $P(x_1)$ определяющий момент силы торможения от вырывающийся из сопла 9 (рис. 1b) потока воздуха 14. Тогда математическая модель системы «ветровая турбина-ЦР-генератор» примет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2; \\ \frac{dx_2}{dt} = (\sin x_1 \cos x_1) \cdot x_3^2 - \sin x_1 - \gamma \cdot x_2; \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{1}{J(x_1)} \cdot H \cdot (\cos x_1 - \rho) + P(x_1) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} J(x_1) &= J_1; \\ \gamma &= b/m(gl)^{1/2}; \\ H &= (k_1 \cdot l)/g; \\ \rho &= F/k_1. \end{aligned} \quad (5)$$

Логично предположить, что функция $P(x_1)$ имеет следующий вид:

$$P(x_1) = -k_3 \cdot \cos x_1,$$

где $k_3 > 0$, коэффициент пропорциональности.

С учетом выше сказанного окончательная математическая модель МЭС (рис.1 b) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2; \\ \frac{dx_2}{dt} = (\sin x_1 \cos x_1) \cdot x_3^2 - \sin x_1 - \gamma \cdot x_2; \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{1}{J_1} \cdot H \cdot (\cos x_1 - \rho) - k_3 \cdot \cos x_1, \end{cases} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \gamma &= b/m(gl)^{1/2}; \\ H &= (k_1 \cdot l)/g; \\ \rho &= F/k_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Компьютерным аналогом системы уравнений (6), предназначенным для его интегрирования, является структурная схема в среде MatLab/Simulink (рис. 3).

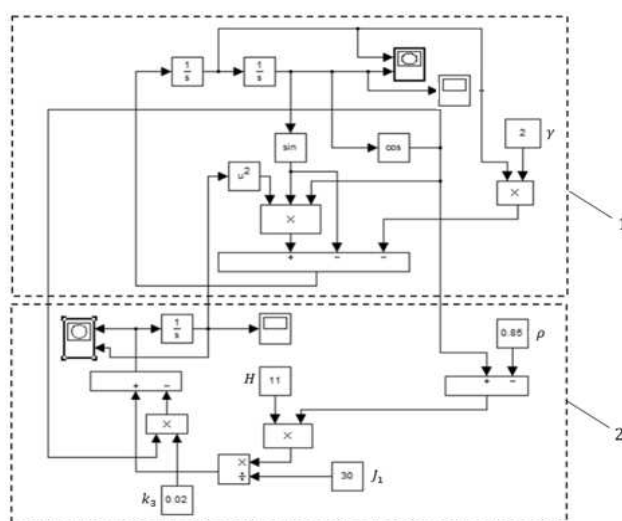


Рисунок 3 – Структурная схема системы «ветровая турбина-ЦР-генератор»

Она состоит из структурных схем: 1 – центробежного регулятора; 2 – системы «гидро-турбина-генератор». Визуализация результатов моделирования в виде зависимостей $\varphi^\circ(t)$, $\omega(t)$ и фазовых портретов осуществляется в соответствующих блоках (рис. 4, 5). Параметры математической модели (6, 7) для моделирования работы системы «ветровая турбина-ЦР-генератор»: $\gamma = 4$; $\rho = 0.7$; $H = 15$; $J_1 = 30$; $k_3 = 0.04$.

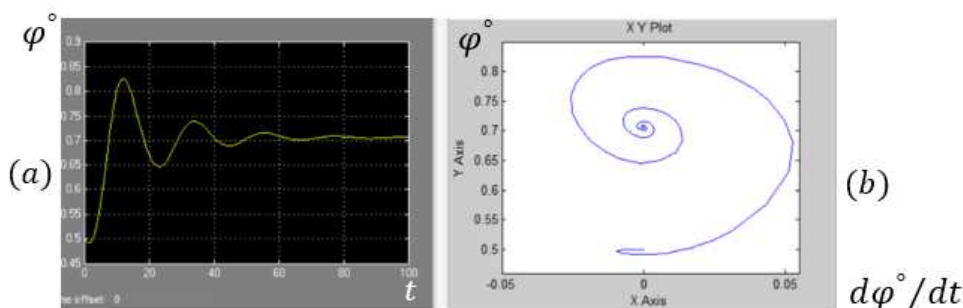


Рисунок 4 (a) – зависимость от времени угла отклонения стержня ЦР, от своего вертикального положения; (b)– фазовый портрет

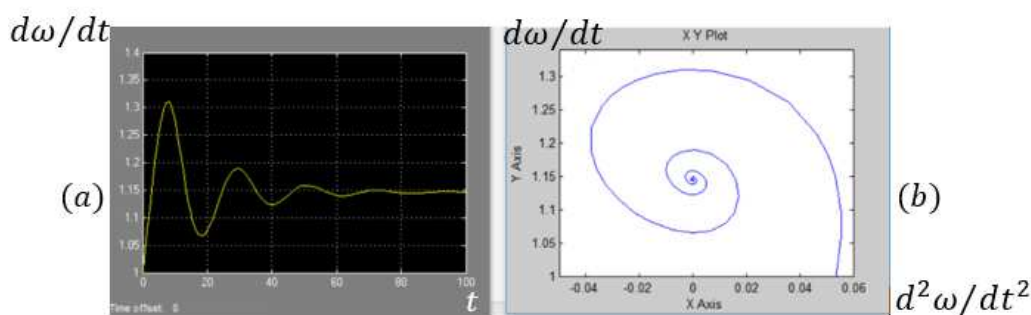


Рисунок 5 (a) – зависимость от времени угловой скорости вращения вала МЭС; (b) – фазовый портрет

Постановка задачи №2. Разработка новой конструкции МЭС с целью увеличения его мощности, расширения, используемого для выработки электроэнергии энергоносителей (потоков воды, ветра, восходящего потока нагретого воздуха) и стабилизации режимов его работы.

Решение задачи №2 и описания МЭС

Результаты решения поставленной задачи показаны на рис. 6, 7, 8, где МЭС может функционировать не только под воздействием потока воды, но и от потоков ветра, и восходящего потока, нагретого солнечными лучами воздуха (рис. 6, 7). При этом принцип автоматической регулировки частоты вращения агрегатов сохраняется, к тому же в систему стабилизации режима работы устройства добавлен и элемент 25 для демпфирования скачка давления при резких порывах ветра, поступающего через диффузор 7 (рис. 6, 7). Это устройство совместно с ЦР улучшает стабильный режим работы МЭС.

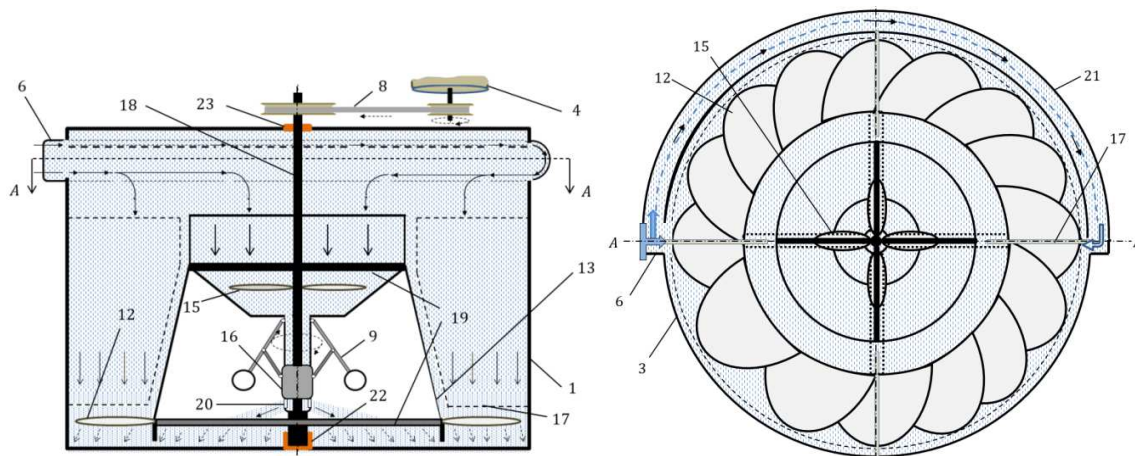


Рисунок 6 – Гидротурбина увеличенной мощности с центробежным регулятором

Описание элементов конструкции (рис. 6). Рассмотрим только функционально важные элементы, к которым относятся: неподвижная часть устройства — это корпус гидроагрегата 1 с подводящими к нему напорными трубопроводами 6, 21, по которым поток воды поступает с двух сторон во внутреннюю область гидроагрегата; вращающаяся часть — это вал 18, к которому жестко прикреплен полый маховик — 13, состоящий из отдельных элементов.

Верхняя область маховика по форме чашеобразна и заполнена водой. Продолжение маховика, т.е. нижнее его основание, представляет собой полый цилиндр, полость которого

сообщается с верхним чашеобразным участком маховика. Следовательно, этот участок также заполнен водой. В нижней цилиндрической области чашеобразного участка маховика приварен «юбкообразный» полый участок в виде усеченного цилиндра конической формы, который в верхней и нижней частях жестко прикреплен к двум крестовинам – 19, которые в свою очередь приварены к валу – 18.

К торцевой нижней части «юбкообразного» участка маховика жестко прикреплено гидрокосило с лопастями - 12.

С внутренней стороны корпуса 1 приварены перпендикулярно к нему четыре направляющие перегородки 17, создающие условия для поступательного движения потока воды сверху вниз до достижения лопаток гидроагрегата.

В состав маховика входят и элементы ЦР 9, 16 и лопасти 15, жестко прикрепленные к валу, которые при поступательном движении воды в полости маховика сверху вниз при открытом отверстии 20 оказывают тормозящее действие. В случае увеличения скорости вращения муфты выше номинальной, отверстия 20 открываются из-за перемещения вверх муфты 16 от действия ЦР.

В правой части (рис. 6) показан вид сверху МЭС по сечению А – А. Электроэнергия вырабатывается генератором 4, вал которого приводится во вращение ременной передачей 8.

На рис. 6 окрашенные в темный (голубой) цвет участки соответствуют областям МЭС, заполненные водой – неокрашенные области соответствуют воздушному пространству.

Основные функциональные элементы конструкции (рис. 7). На чертеже представлены варианты использования разработанной гидроветряной турбины для выработки электроэнергии: 1 – гидроагрегат, описание которого дано выше по тексту; 2 – сочленённый с помощью дистанционно управляемой муфты ветровой агрегат; 3 – вид сверху на гидроагрегат по сечению А – А; 4 – генератор, вал которого приводится во вращательное движение ременной передачей 8; 7 – диффузор, от которого поток ветра поступает в ветровой агрегат через трубопровод 23; 6 – трубопровод, по которому напор воды 11 поступает в гидроагрегат; 21 – солнечная труба [4] представляет собой аппарат для использования солнечной энергии посредством конвекции нагретого воздуха. В своей простейшей форме она состоит из трубы, окрашенной в черный цвет. В дневное время солнечная энергия 20 нагревает трубу, тем самым нагревая воздух внутри нее с формированием в результате восходящего потока воздуха внутри трубы; 18 – прозрачная полая емкость сферической формы для нагрева воздуха тепличным эффектом, которая соединена с солнечной трубой. В результате теплый воздух создает в трубе восходящий поток, который через трубопровод 23 поступает в ветровой агрегат; 19 – отверстия, через которые из окружающего пространства холодный воздух поступает в емкость 18; 25 – устройство для демпфирования скачка давления воздушного потока в трубопроводе 23, а следовательно и во внутренней области ветрового агрегата 2, при сильном порыве ветра, поступающего в диффузор; 22, 24 – клапаны; 26 – генератор, вал которого приводится во вращательное движение непосредственно от вала ветрового агрегата 2 через дистанционно управляемую муфту 27.

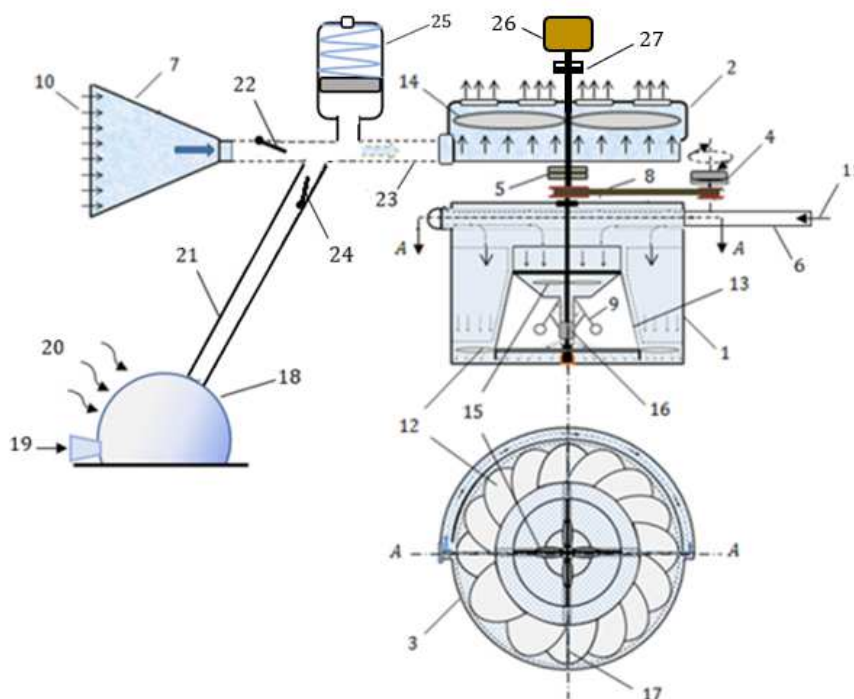


Рисунок 7 – Варианты использования гидроветряной турбины для выработки электроэнергии

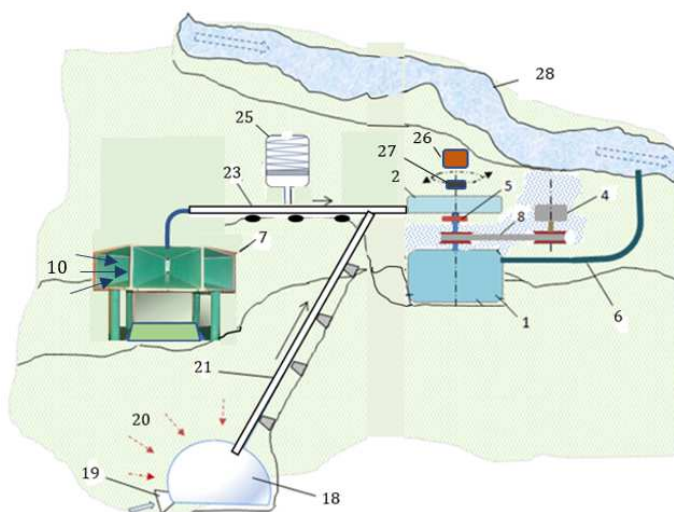


Рисунок 8 – Участок горной местности с возможными вариантами взаимного расположения энергоносителей и гидроветровой турбины

На рисунках 7 и 8 все элементы, а также их алгоритмы функционирования совпадают, за исключением того, что на рис. 7 элементы расположены в предполагаемой горной местности с возможными вариантами взаимного расположения энергоносителей и гидроветровой турбины. Кроме того, на рис. 7 изображен диффузор реальной конструкции – 7, а также изображена река – 28, от которой по напорному трубопроводу - 6 поток воды поступает в гидротурбину - 1.

Взаимодействия конструктивных элементов МЭС при их функционированиях

Энергоносителями, от механических воздействий которых на рабочие элементы МЭС функционируют ветровые и гидроагрегаты, являются: поток воды – 11 (рис. 7) поступающий от реки – 28 по напорному трубопроводу – 6; поток ветра – 10 поступающий в ветровую турбину – 2 от диффузора – 7 через напорный трубопровод – 23; поток нагретого восходящего потока воздуха внутри трубы – 21.

Стабилизацию режимов работы МЭС обеспечивает рассмотренный выше по тексту ЦР расположенный в гидроагрегате - 1 и демпфер – 25.

Демпфер работает следующим образом. При устойчивом и стабильном поступлении потоков ветра через диффузор 7, а также нагретого воздушного потока по солнечной трубе 21, клапаны 22 и 24 под действием движущихся потоков воздуха находятся в открытом состоянии, и поток воздуха поступает в ветровую турбину, совершая работу. Движение нагретого воздуха по солнечной трубе более-менее стабильно в отличие от ветрового потока, поступающего в диффузор 7.

Допустим, в какой-то момент времени произошел сильный порыв ветра 10. Давление воздуха скачкообразно возрастает, и фронт повышенного давления, распространяясь по трубе 23, доходит до места сочленения труба 21, при этом клапан 24 закрывается, и избыток давления воздуха, воздействуя на поршень демпфера 25, сжимает пружину демпфера, где аккумулируется избыток энергии. При уменьшении порыва ветра пружина демпфера, разжимаясь, толкает поршень обратно, и избыток энергии, аккумулированный в сжатой пружине в виде потока воздуха, возвращается в ветровую турбину, т.к. в это время клапаны 22, 24 закрываются. Так в среднем сглаживаются скачки давления в ветровой турбине, стабилизируя режим работы.

Вышеприведенные рассуждения относятся к качественному анализу процессов в системе, а их количественный анализ возможен только после завершения разработки математической модели рассматриваемой системы (рис.7, 8).

Заключение. Представленные на рисунках 7 и 8 системы МЭС, состоящие из ветровой и гидро микроэлектростанций, при выработке электроэнергии в зависимости от обстоятельств могут работать в различных сочетаниях, так как их валы между собой соединены дистанционно управляемыми муфтами.

Будем предполагать, что в реке всегда достаточное количество воды, и гидромикростанция может устойчиво генерировать электроэнергию приемлемого качества по частоте благодаря действия ЦР и обеспечивать электроэнергией свою нагрузку с некоторым запасом.

В то же время при благоприятных обстоятельствах (наличие устойчивого ветра достаточной силы, но небольшими по силе порывами, а также при наличии сильной солнечной радиации) ветровая микростанция может обеспечивать свою нагрузку электроэнергией приемлемого качества из-за содержания демпфера 25, сглаживающего небольшие порывы ветра.

При описанных выше обстоятельствах микроэлектростанции могут работать отдельно, так как соответствующие муфты расчлениают их валы. В других обстоятельствах они могут работать совместно на общую нагрузку благодаря запасу мощности гидроагрегата, или работает только гидромикростанция, например, в темное время суток и слабом ветре или полном его отсутствии.

Эффективность технических решений при изменении конструкции МЭС (рис. 1(b)) обоснована результатами компьютерного моделирования.

Все задачи, поставленные в работе, решены за исключением разработки математической и компьютерной модели всей системы, изображенной на рисунках 7, 8, который, находится на этапе завершения.

Все новые технические решения работы переданы в виде заявки на изобретения на экспертизу в Кыргызпатент.

Литература

1. Ниязова Г.Н., Яблочников А.М., Сатаркулов К. Принцип стабилизации частоты микрогидроэлектростанций нового типа // Известия ВУЗов Кыргызстана. – 2016. – № 6. – С. 30–33.
2. Бакасова А.Б., Сатаркулов К.А., Ниязова Г.Н., Яблочников А.М., Усубалиева Г.К. Моделирование микро-ГЭС малой мощности с маховиком, автоматически регулирующим момент инерции // Информатика и системы управления. – 2019. – № 1 (59). – С. 36 – 45.
3. Бакасова А.Б., Сатаркулов К., Ниязова Г.Н., Сатаркулов Т.К. О методе анализа надежности и диагностики состояний микро-ГЭС для автономного электро-снабжения Проблемы автоматизации и управления. –2020. – № 1 (38). – С. 15–20.
4. Применение концентратора и завихрителей воздушного потока для повышения эффективности ветровых установок <https://vikidalka.ru/2-196929.html> (Дата обращения 01.10.2021).
5. Хэссард Б., Казаринов Н., Вэн И. Теория и приложения бифуркации рождения цикла; пер. с англ. – М.: Мир, 1985.

УДК 62-50004.384

Тохметова К.М., kuralay_tokhmetova@mail.ru

Нурмаганбетова Ж.С., janaraaru@mail.ru

Нурмагамбетова Г.С., gulmira_gulmirka@mail.com

Жумагулова Д.К., appdinara@mail.ru

*Карагандинский технический университет, г.Караганда,
Республика Казахстан*

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТЕНДОМ «МЕХАТРОННАЯ ЛИНИЯ FESTO»

В статье рассматривается стенд «Мехатронная линия FESTO», который находится в 134-й аудитории кафедры автоматизации производственных процессов Карагандинского технического университета. Данный стенд является объектом исследования комплексного дипломного проекта. Было разработано программное обеспечение на базе программируемого логического контроллера Mitsubishi FX-5U 32M. Представлен алгоритм работы стенда. Приведено полное описание SCADA-системы, разработанной в среде MasterSCADA 3.x. Авторами разработано учебное методическое пособие для изучения стенда «Мехатронная линия FESTO». Данное методическое пособие позволит обучать студентов и магистрантов кафедры автоматизации производственных процессов, а также повысить уровень квалификации специалистов и инженеров.

Ключевые слова: индустрия 4.0, мехатронная линия, робот-зажим, конвейер, автоматизация, система управления, контроллер, панель оператора, SCADA-система, HMI.

Введение

Развитие автоматизированных систем управления технологическими процессами – один из важнейших вопросов в настоящее время. При этом для решения задач оптимального управления объектами, входящими в состав автоматизированной системы управления, предусматривается совершенствование вычислительных систем на основе современных многофункциональных промышленных контроллеров, частотных преобразователей, глобальных и локальных телекоммуникационных сетей и внедрение глобальной технологии в технологические процессы. В настоящее время большинство промышленных предприятий в стране приступили к проектам по внедрению технологий Индустрии 4.0 в полном объеме [1].

Развитие информационно-коммуникационных технологий, автоматизация и роботизация производственных процессов включают технологии Индустрии 4.0. Примерами таких производственных процессов являются объекты легкой и тяжелой промышленности, оснащенные гибкими автоматизированными производствами по изготовлению сложных изделий, заготовок или полуфабрикатов, в том числе технологические процессы сборки, сортировки, транспортировки, сверления, наклеивания этикеток, окраски, маркировки и др.

В данной статье в качестве объекта исследования рассматривается стенд «Мехатронная линия FESTO», осуществляющий сверление деталей и их сортировку по цвету и материалу. Стенд расположен в аудитории 134-й кафедры автоматизации производственных процессов Карагандинского технического университета. Эта аудитория – филиал учебного центра Mitsubishi Electric-KAZPROMAVTOMATIKA [2].

Объектом исследования комплексного дипломного проекта является исследуемый стенд. В процессе проектирования были выполнены следующие задачи:

1. Разработка программного обеспечения для программирующего логического контроллера Mitsubishi FX-5U 32M, который является «мозгом стенда».

2. Разработка программного интерфейса для оператора панели.

3. MasterScada SCADA-разработка SCADA-системы станда в среде программирования.

4. Осуществление дистанционного управления стандом через программное приложение GOT Mobile.

5. Создание на станде «Мехатронная линия FESTO» методического комплекса и учебных занятий в видеоформате для студентов и магистрантов для обучения.

Применяемые на станде устройства используются в области изготовления лекарственных средств и в других областях автоматизации производственных процессов, таких как сортировка и упаковка (упаковка) заготовок, в частности, станд «Мехатронная линия FESTO» является единственным реальным аналогом промышленных объектов.

Описание станда

На рисунке 1 представлено внешнее изображение станда «Мехатронная линия FESTO». Станд состоит из интегрированной системы, которая включает в себя: оптические датчики, две конвейерные линии, робот-зажим, световой барьер, модуль сверления, толкающий механизм, клапаны, а также элементы пневматической системы.



Рисунок 1 – Общий вид станда «Мехатронная линия FESTO»

В зависимости от заданных функций станда и механизмов исполнения включает три станции, т. е. станции транспортировки деталей, определения/различения цвета деталей и их обработки (сверления) и хранения (показано на рисунке 2)

Алгоритм работы станда

На станде процесс начинается с получения детали из «склада» деталей роботом-зажимом. Механизм подачи детали после подачи детали робот-зажим помещает деталь на конвейер второй станции для определения ее цвета и правильного положения. Частица проходит через световой барьер и движется по конвейерной линии, таким образом с помощью электромагнитного излучения определяется цвет частицы. Далее движущаяся по конвейеру частица достигает площади робота-зажима, а он передает ее оптическому датчику, определяющему правильность (отсутствие дефекта) детали. После обнаружения деталь возвращается на конвейер и переходит на третью станцию.



Рисунок 2 – Станции, входящие в состав стенда «Мехатронная линия FESTO»:
а– станция транспортировки; б– танция измерения (определение цвета и материала детали); в – буровая станция

На третьей станции производится бурение, после завершения процесса бурения деталь перемещается по конвейерам. После этого детали размещаются в складах в соответствии с их цветом. Кроме того, предусмотрены режимы «может быть ошибка» и «аварийный» при работе стенда. В частности, это отсутствие детали в «хранилище» деталей или чрезмерное количество деталей и т.д. При этом у пользователя появляется возможность ручного режима управления.

Разработка программного обеспечения стенда

Основным вычислительным устройством блока управления процессорного стенда «Мехатронная линия FESTO» является промышленный контроллер FX5U-32M новой серии Mitsubishi MELSEC iQ - F. Для программирования и настройки используется программное обеспечение GX Works3. В качестве языка программирования была выбрана логика релейной связи (LAD).

В качестве панели оператора используется панель Mitsubishi GT 27 серии GOT 2000. На рисунке 3 показан промышленный контроллер FX5U-32M серии Mitsubishi MELSEC iQ-F и внешний вид панели GT 27 HMI серии Mitsubishi GOT 2000.



Рисунок 1 – Промышленный контроллер
а –FX5U - 32M серии Mitsubishi MELSEC iQ-F и панель б – GT 27 HMI серии Mitsubishi GOT 2000

Разработка экрана для панели HMI осуществляется с помощью программы GT Works 3. Это позволит панели HMI создать удобную и доступную мнемозащиту эффективного управления технологическими процессами. Используя все возможные преимущества среды программирования GT Works 3, на стенде «Мехатронная линия FESTO» были разработаны специальные окна управления HMI. Внешнее изображение окон представлено на рисунке. 4.



Рисунок 4 – Основные окна управления панели оператора HMI GOT 2000:
а – автоматическое управление; б – ручное управление.

С помощью панели HMI пользователю предоставляется возможность полностью автоматического управления стандом. Каждая станция, входящая в состав станда, также имеет возможность индивидуального ручного управления, в частности, при ручном управлении возможно выполнение таких функций, как включение конвейера, его отключение, подача детали на конвейер. Кроме того, панель HMI отображает информацию о деталях вдоль конвейеров, включая такую информацию, как цвет детали и количество деталей, поступивших на склады.

Разработка SCADA-системы станда в программе MasterSCADA

SCADA-система для станда «Мехатронная линия FESTO» разработана в российской программной среде MasterSCADA 3.x.

При разработке SCADA-системы для станда использовались такие мультимедийные элементы, как конвейер, дрель в палитре элементов. Внешний вид станда выполнен в программе PAINT. Разработанная SCADA-система представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – SCADA-система для станда «Мехатронная линия FESTO»

На окне SCADA-системы, т. е. мнемосхемы, отображается информация об исполнительных устройствах станда и измерительных устройствах, в частности о конвейерах, роботизированных зажимах и датчиках, их рабочем состоянии, а также о цвете детали, расположенной вдоль конвейера.

Несмотря на то, что мнемосхема успешно реализована, в процессе работы возникла трудность установления связи между контроллером со SCADA. Это объясняется тем, что MasterSCADA взаимодействует с устройствами более низкого уровня через OPC-сервер. Термин «OPC» относится к группе стандартов, описывающих технологии взаимодействия программного обеспечения, разработанного для промышленности автоматизации различных производителей. Как правило, речь идет о стандартизации запросов технических средств низшего уровня (контроллеры, интеллектуальные устройства и т.д.), т. е. используются единые драйверы, с помощью которых программное обеспечение верхнего уровня систем автоматизации может запросить оборудование. Основным преимуществом OPC является интеграция работы с источниками данных. Благодаря стандарту любой OPC-сервер может работать с любой системой SCADA. В результате позволяет подключить любое устройство к любому SCADA.

Связь с контроллером можно осуществлять через следующие интерфейсы: Ethernet, RS 232, RS-485, GSM. В проекте установлена связь с контроллером через Ethernet. Контроллер, который мы используем в проекте, это контроллеры FX5U. Поэтому ему нужен специальный протокол. MasterSCADA решила эту проблему, это Multi-Protocol MasterOPC.

Настройка OPC-сервера не займет много времени. Главное, чтобы он экспортировал переменные из программной среды GX Works3, встроенные в контроллер, и вставлял их в OPC-сервер. Так как на станде используются три контроллера, то при настройке необходимо предоставить соответствующий IP-адрес. О том, что связь установлена, можно проследить в колонке связи. Если выведена надпись «GOOD» (см. рис.6), то можно установить связь с мнемосхемой и посмотреть работу SCADA-системы.

Идентификатор	Регион	Адрес в реги...	Значение	Качество	Время	Тип в сер...	Доступ
C1.Mitsubishi FX5.Diagnosi...			false	GOOD	2021-05-2...	bool	ReadOnly
C1.Mitsubishi FX5.nalichde...	Input (...	6	false	GOOD	2021-05-2...	bool	ReadWr...
C1.Mitsubishi FX5.vverhpo...	Input (...	0	true	GOOD	2021-05-2...	bool	ReadWr...
C1.Mitsubishi FX5.nizhpolz...	Input (...	1	false	GOOD	2021-05-2...	bool	ReadWr...
C1.Mitsubishi FX5.polozhn...	Input (...	2	false	GOOD	2021-05-2...	bool	ReadWr...
C1.Mitsubishi FX5.otpuskz...	Output ...	0	false	GOOD	2021-05-2...	bool	ReadWr...
C1.Mitsubishi FX5.otkrytz...	Output ...	1	true	GOOD	2021-05-2...	bool	ReadWr...
C1.Mitsubishi FX5.podatde...	Output ...	2	false	GOOD	2021-05-2...	bool	ReadWr...
C1.Mitsubishi FX5.dvizhza...	Output ...	3	false	GOOD	2021-05-2...	bool	ReadWr...
C1.Mitsubishi FX5.dvizhza...	Output ...	4	false	GOOD	2021-05-2...	bool	ReadWr...
C1.Mitsubishi FX5.green	Output ...	5	true	GOOD	2021-05-2...	bool	ReadWr...
C1.Mitsubishi FX5.yellow	Output ...	6	false	GOOD	2021-05-2...	bool	ReadWr...
C1.Mitsubishi FX5.red	Output ...	7	false	GOOD	2021-05-2...	bool	ReadWr...
C1.Mitsubishi FX5.polozhz...	Input (...	3	true	GOOD	2021-05-2...	bool	ReadWr...
C1.Mitsubishi FX5.polozhz...	Input (...	4	false	GOOD	2021-05-2...	bool	ReadWr...
C1.Mitsubishi FX5.dat1	Data R...	2	0	GOOD	2021-05-2...	float	ReadWr...
C1.Mitsubishi FX5.dat2	Data R...	3	0	GOOD	2021-05-2...	float	ReadWr...
C1.Mitsubishi FX5.avarm	Internal...	101	false	GOOD	2021-05-2...	bool	ReadWr...
C1.Mitsubishi FX5.avarch	Internal...	103	false	GOOD	2021-05-2...	bool	ReadWr...

Рисунок 6 – Контроль качества сигналов на OPC-сервере

Дистанционное управление стандом с помощью функции GOT MOBILE

С помощью функции GOT mobile реализована возможность просмотра окон на панели НМІ через мобильные устройства (смартфон, планшет), т. е. мониторинга и удаленного управления стандом с помощью мобильных устройств посредством подключения к панели НМІ. Данная функциональная возможность описана на рисунке 7.



Рисунок 7– Схема подключения к функции GOT mobile

Для реализации данной технологии модуль беспроводной связи, в частности Wi-Fi-роутер, подключается непосредственно к панели HMI по кабелю Ethernet. Соответственно, необходимо подключить смартфон или планшет к сети интернет, распространяемой Wi-Fi-роутером. Здесь задействованные устройства, т. е. персональный компьютер, панель HMI, Wi-Fi-роутер и телефон (планшет) связываются с IP-адресом, аналогичным одной локальной сети. Например, 192.168.3.1 ... 192.168.3.19 ... 192.168.3.18 ... 192.168.3.2.

Разработка лабораторно-методического руководства стенда

Разработаны методическое пособие и лабораторные работы по стенду «Мехатронная линия FESTO». Методическое обеспечение, описывающее пошаговые действия работы со стендом, состоит из четырех лабораторных работ:

1. Ознакомление со стендом «Мехатронная линия Festo» и запуск работы первой станции.
2. Запуск работы буровой станции и связь с контроллером.
3. Запуск работы станций измерения и хранения.
4. Подготовка панели оператора к стенду «Мехатронная линия Festo».

Целью данных работ является ознакомление с принципом работы лабораторного стенда, приобретение навыков использования контроллера Mitsubishi для решения задач построения систем промышленной автоматизации, установление связи между контроллером и компьютером, приобретение навыков создания окна HMI для операторской панели Mitsubishi GOT 2000.



Рисунок 8 – Методическое пособие для стенда «Мехатронная линия FESTO»

Заключение

Кроме того, в качестве методико-инструментальной помощи были написаны видеоинструкции. Они размещены на YouTube-канале «Кафедра АПП КарГУ». Надеемся, что представленное методическое пособие и видеоинструкции позволят обучить студентов старших курсов и магистрантов, а также повысить квалификацию инженеров.

На базе промышленного контроллера Mitsubishi Melsec L разработан блок управления стендом процессорной техники FESTO, написана рабочая программа для данного блока, использовано устройство HMI GOT 2000 для данного стенда, а также разработан комплекс с дистанционным управлением с использованием функции GOT Mobile.

Разработанный учебный комплекс позволяет студентам различных электромеханических специальностей получить практические навыки по настройке и эксплуатации системы InTouch SCADA. Кроме того, стенд позволяет получить практические навыки по программированию промышленных контроллеров Mitsubishi серии Melsec I, а также изучить процессы, происходящие при управлении процессами поддержания уровня, давления, потока и температуры с помощью регулировки PID.

Разработаны методические указания и лабораторный практикум, которые помогут студентам эффективно изучить принципы работы с мехатронной сетью Festo на основе наблюдателей FXU.

Литература

1. 7 ключевых технологий Индустрии 4.0: от машинного обучения до 3D-печати. Партнерский материал 19 марта 2020. [High-tech.fm/2020/03/19/industry-4-0](https://high-tech.fm/2020/03/19/industry-4-0).
2. Фешин Б.Н., Шпакова Л.Г., Тохметова К.М. Оптимальное управление роботами в гибком автоматизированном производстве // Труды университета. – Караганда: КарГТУ. – № 1. – 2019. – С. 145–148.
3. Каверин В.В., Эм Г.А., Байц В.Е., Имангалиева К.Ж., Ежебаева Ш.Е. Исследование характеристик энергии, наведённой в грозотросе высоковольтных воздушных линий электропередачи. Автоматика и информатика. – КарГУ, 2020, №1. – С. 20–27.

УДК: 621.3.045.1:621.314.222.6

КҮЧ МАЙ ТРАНСФОРМАТОРЛОРУНУН КЕЛЕМТЕСИНИН ОРОМОСУНДАГЫ ЧАБЫЛУУСУНА ДИАГНОС ЖҮРГҮЗҮҮ ҮЧҮН ТЕХНИКАЛЫК КАРАЖАТТАРДЫ ЖАНА ЫКМАЛАРДЫ ИШТЕП ЧЫГУУ

Калматов У.А., т.и.к., доцент, ukalmatov@bk.ru.

Борукеев Т.С., т.и.к., доцент, tuigun_ktu@rambler.ru

И. Раззакков атындагы Кыргыз мамлекеттик техникалык университети

Бул макалада трансформаторлордун оромдорундагы түрмөктөр аралык чабылуусун аныктоо максатында күч май трансформаторлоруна (КМТ) диагнос коюунун жаңы ыкмасы сунуш кылынат, аны термикалык башкаруу ыкмаларына таандык кылуу мүмкүн. Сунуш кылынган ыкма, мониторинг процессинде алынган негизги элементтердин температурасынын өзгөрүшүнүн чыныгы динамикасынын көрсөткүчүн симуляциялоонун натыйжасында температуранын өзгөрүшүнүн осциллограммасы менен салыштырууга негизделген. Трансформаторлордун оромдорунун түрмөктөр аралык чабылуусун (ТАЧ) табуу максатында КМТ диагностоонун арзан так ыкмасына карата жөнөкөй ыкманы иштеп чыгуу актуалдуу бойдон калууда. Жогоруда көрсөтүлгөн талаптарга кыйла толук жооп берүүчү ыкмалардын бири болуп көзөмөлдөөчү жылуулук усулу кызмат кылышы мүмкүн, ал КМТ температурасын өлчөөгө, баалоого жана талдоого (термографиялык изилдөөгө) негизделген. Трансформатордо ТАЧ болуусун көрсөтүүчү белги майдын учурдагы оордукка таандык эмес температурасы жана анын иштөөсүнө мүнөздүү эмес дүрүлдөөсү болушу мүмкүн

Ачык сөздөр: күч май трансформаторлору, диагностика, мониторинг жүргүзүү, трансформатор майы, жылуулук датчиги, оромдор, түрмөктөр аралык чабылуу.

Бүгүнкү күндө күч трансформаторлорунун аралыктан диагнос жүргүзүү усулдары начар өнүккөн. Күч май трансформаторлору диагностоонун колдонулуп жаткан усулдары жеткиликсиз ыкчам болуп саналат, анткени КМТ текшерүү оңдоо бригадасынын объектге чыгуусун талап кылат. Андан тышкары бир катар усулдар талдоо же болбосо кымбат баалуу жабдуулар (мисалы, жылуулук чагылуусун контролдоо усулу) үчүн көп убакытты талап кылат [1-3].

Трансформаторлордун оромдорундагы түрмөктөр аралык чабылуусу оромдордун ар түрдүү участокторунда, башкача айтканда, бири-бирине тийишкен түрмөктөрдө болушу мүмкүн:

трансформатор майы менен;

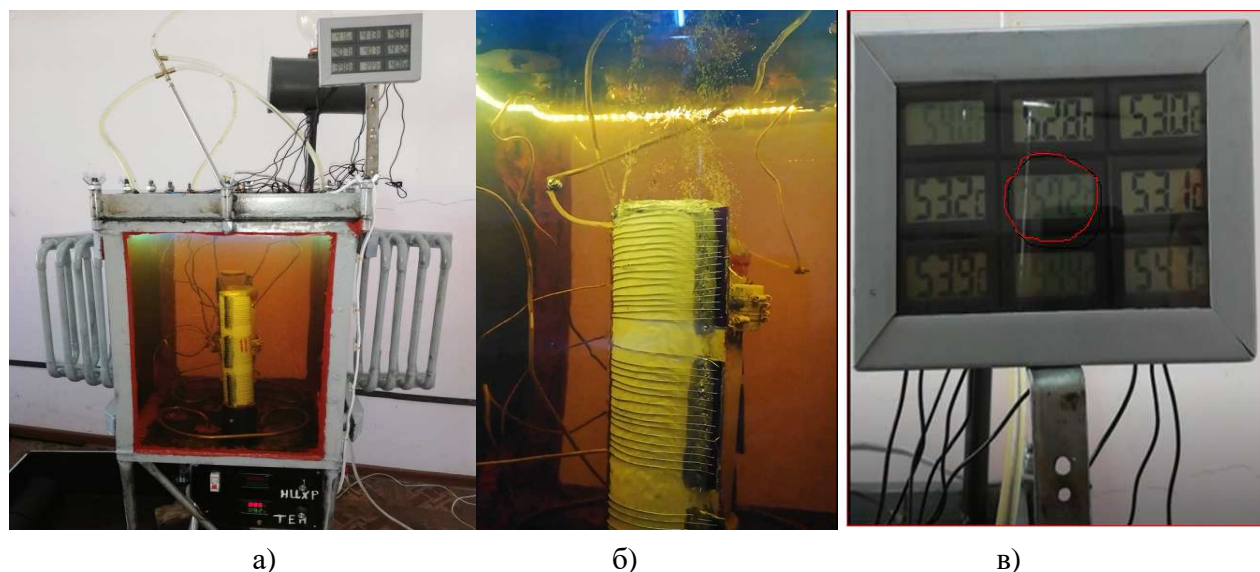
жанаша түрмөктөр менен.

Биринчи вариантта, жабыша калууларда ысыган май өйдө карай агылат, майдын температурасынын мааниси, анын жогорку катмарында бузулган оромдун үстүндө жайгашкан, ысыкты билдиргичте катталат.

Экинчи вариантта, бардык бузулган ором ысыйт, бул өз артынан оромдун үстүндөгү майдын температурасынын жогорулашына алып келет (2,3-сүрөттөр).

Айтылган божомолдорду текшерүү үчүн:

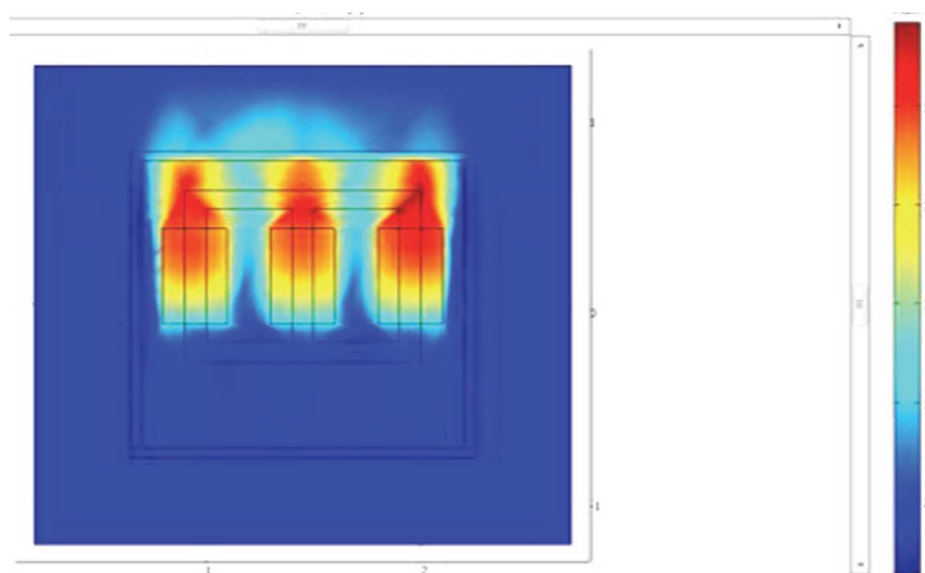
- Үч оромдуу бир катмарлуу түрмөк менен аткарылган күч май трансформаторунун эксперименталдык стенди иштеп чыгарылган жана түзүлгөн (1-сүрөт).



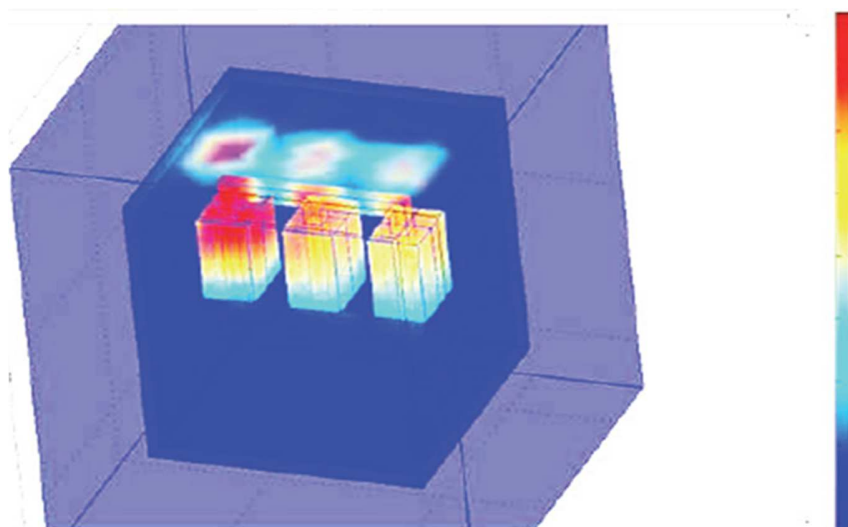
а) б) в)
Сүрөт 1 – Күч май трансформаторунун эксперименталдык станди

- COMSOL Multiphysics программалык пакетин пайдалануу менен трансформатордун жылуулук шарттамдарын моделдөөнүн натыйжалары пайдаланылган [4].

COMSOL Multiphysics – бул өзү кубаттуу интерактивдүү чөйрө болуп саналат, ал дифференциалдуу теңдемелерге, алып айтканда туунду жана интегралдык теңдемелерге негизделген, көпчүлүк илимий жана инженердик маселелерди моделдөө жана акыркы элементтерин эсептөө үчүн кызмат кылат [4].



Сүрөт 2 – Үч фазалуу кемтиги жок күч трансформаторунда жылуулук талаасын бөлүштүрүү [5]



Сүрөт 3 – Үч фазалуу А фазасында (биринчи сол ором) кемтиги бар күч трансформаторунда жылуулук талаасын бөлүштүрүү [5]

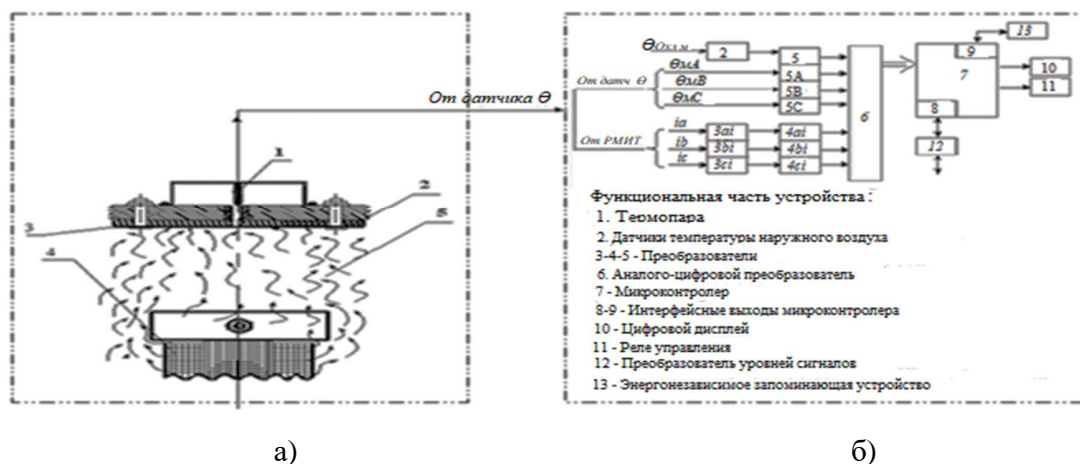
Эксперименттин жана моделдештирүүнүн (2,3-сүрөттөр) натыйжалары биз киргизген болжомолдоолордун адилеттүүлүгүн ырастады.



Сүрөт 4 – Маалымат жеткирүүчү курулманын КМТга жайгашуусу: 1 – МЖК; 2 – трансформатордун багынын капкагы; 3 – ысытылган трансформатор майынын агымы

Анын негизинде КМТ түрмөктөр аралык чабылуусун диагностоо үчүн маалыматты жеткирүүчү курулма (МЖК) сунуш кылынган 1 (4,5-сүрөттөр). Диагностиоо курулмасынын иштөөсүн түшүндүрүү үчүн, ошондой эле билдиргичтерден курулмага белги берилүүчү агын өткөргүчтүн конструкциясын тактоо үчүн, анын оромдорунун үстүндөгү жогорку катмарларындагы майдын температурасын өлчөө үчүн зарыл болгон элементтери менен үч фазалуу КМТ конструкциясы көрсөтүлгөн (4,5-сүрөттөр).

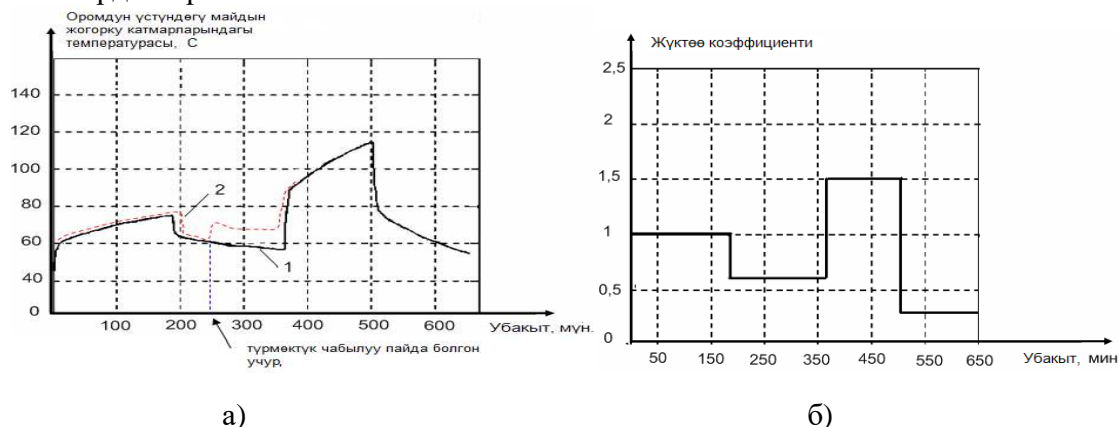
Биздин сунушубузга ылайык, бактын капкагында 2 (5-сүрттөр а) күч трансформаторунун оромдорунун үстүндө жайгашкан сайлуу үч көзөнөк каралган, аларга майдын температурасын билдиргичтерден маалыматтарды алуу үчүн 2, атайын агын



Сүрөт 5 – а) Жылуулук датчиги (термопара) схематикалык сүрөттөлүшү: 1-термопара; 2-стеклотекстолит; 3-жез фольгасы; 4-ысыган майдын агымы; 5-трансформатордун орому; б) термодатчиктин функционалдык схемасы

өткөргүчтөр 3, буралат, алардан маалыматтар температуралардын билдиргичтеринин калыптарына 10 (3_A , 3_B , 3_C) 5 (сүрөт б), келип түшөт, алардын кирмелери күч трансформаторунун майынын температурасын билдиргичтер менен бириктирилген, ал эми чыкмалары аналогдук-сандык кайра түзүүчүнүн экинчи кирмелери менен бириктирилген.

Күч трансформаторунун оромдорунун үстүндө жайгашкан май температурасынын билдиргичтери менен үч атайын агын өткөргүчтөрүн киргизүү, күч трансформаторун тарамдан убактылуу ажыратууну талап кылбастан, оромдордун жылуулук абалын түздөнтүз көзөмөлдөөгө мүмкүнчүлүк берет, анткени оромдор менен көзөмөлдөнүүчү суутуучу чөйрө алардан ысуу жана өйдө жылуу менен көтөрүүчү күчтөрдүн эсебинен алардын үстүндө жайгашкан температура билдиргичтерине жетип 2, алардын абалы жөнүндө маалыматтарды берет.



Сүрөт 6 – а) Жүк графиги; б) Оромдун үстүндөгү майдын жогорку катмарларындагы температуранын графиги $^{\circ}\text{C}$; 1 – график менен дал келтирилген оромдун үстүндөгү майдын жогорку катмарларындагы майдын өзгөрүүсүнүн жүгү; 2 – дал келбеген өзгөрүү.

Оромдордун жылуулук абалдарынын кыйчалыштыгы ар бир оромдун (6-сүрөт) электр жүктөрүнүн графикасынын өзгөрүү динамикасын, оромдун үстүндөгү майдын жогорку катмарынын температурасы боюнча баалануучу, ар бир оромдун жылуулук абалынын өзгөрүү динамикасы менен салыштыруунун натыйжалары боюнча бааланат. Эгерде салыштырылып жаткан процесстер дал келишсе 1, (6-сүрөт, а), оромдордун жылуулук абалы андан ары эксплуатациялоого уруксат берет, эгерде андай болбосо 2, (6-сүрөттөр, б) – мүмкүн болуучу түрмөктүк чабылуудан качуу чараларын көрүү зарыл.

5-сүрөттө келтирилген функционалдык схемага ылайык, сунуш кылынган курулма төмөнкүлөрдү камтыйт:

- тышкы абанын температурасынын билдиргичи 9, биринчи өлчөгүч кайра түзүүчүнүн кирмесине кошулган чыңалуу-каршылыгы;

- чыңалуу-каршылыгынын экинчи өлчөгүч кайра түзүүчүсүнүн кирмесине кошулган (4_A , 4_B , 4_C) трансформатордун майынын температурасынын үч билдиргичи 3_A , 3_B , 3_C ;

- агындын үч билдиргичи 3_{ai} , 3_{bi} , 3_{ci} , трансформатордун төмөнкү чыңалуусу тарабынан жандырылган, агын-чыңалуунун 4_{ai} , 4_{bi} , 4_{ci} . тиешелүү өлчөм кайра түзүүчүлөрүнө киргизүү менен бириктирилген.

Каршылык-чыңалуунун биринчи, экинчи өлчөм кайра түзүүчүлөрүнүн чыкмалары жана үчүнчү агын-чыңалуунун өлчөм кайра түзүүчүсү тийиштүүлүгүнө жараша аналогдук-сандык кайра түзүүчүнүн 6 биринчи, экинчи жана үчүнчү чыкмалары менен бириктирилген, алардын сандык чыкмалары микрокөзөмөлчүнүн 7 тиешелүү кирмелерине кошулган. Микрокөзөмөлчүнүн 7 сандык чыкмалары дисплей 8 жана башкаруу релеси 9 менен бириктирилген. Микрокөзөмөлчүнүн интерфейстик чыкмалары микрокөзөмөлчү 7 менен бириктирилген, демек тийиштүүлүгүнө жараша кайра түзүүчүнүн белгилеринин деңгээлдери 13 жана энергияга көз каранды эске тутуучу 12 курулма менен кошулган.

Мониторингдин курулмасы төмөнкүдөй иштейт. Микрокөзөмөлчү 12 маалыматтарды жыйноо тутумунун жана эсептеп чыгаруучу модулдун иш-милдетин аткарат. Изгилегичтүү (регулируемый) көп функционалдуу өлчөөчү трансформаторунун жардамы менен ар бир фазанын i_a , i_b , i_c агындарын өлчөө жүзөгө ашырылат. Δt барабар убакыт интервалы аркылуу тиешелүү билдиргичтердин жардамы менен тышкы абанын температурасын, оромдордун үстүндөгү θ_A , θ_B , θ_C майдын, күч трансформаторунун A , B , C фазаларынын температурасын өлчөө жүзөгө ашырылат. Маани Δt КМТ өлчөм тибине көз каранды болот жана фазалардын жүктөрүнүн агындарынын маанилери өзгөргөндөн жана андан ары оромдордун температурасы турукташкандан кийин, а демек, θ_A , θ_B , θ_C маанилер турукташкан маанилерге ээ болгондон кийин тууралап тандалып алынат.

Өлчөнгөн чоңдуктар 10 (3_A , 3_B , 3_C) жана (4_{ai} , 4_{bi} , 4_{ci}) өлчөөчү кайра түзүүчүлөр аркылуу текшерилип жаткан чоңдуктардын маанилеринин кайра түзүүчү пропорционалдуу экилтик коду жана бул коду микрокөзөмөлдөөчүгө 7 өткөрүп берүүчү аналогдук-сандык кайра түзүүчүнүн 6 кирмелерине келип түшөт. Өлчөнгөн чоңдуктардын маанилерин микрокөзөмөлдөөчү дисплейде 8 чагылдырат, энергияга көз каранды эстеп калуучу курулмада 13 сактайт, жана зарыл болгондо, белгилердин деңгээлдерин кайра түзүүчү 12 аркылуу компьютерге берет.

Микрокөзөмөлдөөчүнү программалык кымсыз кылуу төмөнкү алгоритм менен иштейт:

- тышкы абанын $\theta_{охл.}$, айкын убакыт шарттамында өлчөнгөн температурасынын маанилеринин, КМТ оромдорунун үстүндөгү майдын температураларынын (θ_A , θ_B , θ_C) жана ар бир фазанын жол берилген агындарынын жүктөрүнүн негизинде убакыттан көз карандылыктардын ($\theta_A(t)$, ($\theta_B(t)$), ($\theta_C(t)$), математикалык моделдери түзүлөт;

– көз карандылыктарды $\theta_A(t)$, $\theta_B(t)$, $\theta_C(t)$ жуптар боюнча салыштыруу менен төмөнкүдөй корутундуга келүүгө болот:

– эгерде, Δt маанисин эсепке алганда, бул көз карандылыктар окшош болушса 1 (6-сүрөт, а, б,) анда түрмөктөр аралык жабыша калуулар жок деп эсептөөгө болот;

– тескерисинче болгон учурда, кайда салыштырылып жаткан көз карандылыктар бузулса, ошол фазада түрмөктөр аралык жабыша калуулардын пайда болушу мүмкүн 2 (6-сүрөт, а, б.).

Салыштырылып жаткан көз карандылыктардын окшоштуктарынын бузулушунун себебин карайбыз.

Айталы, кандайдыр-бир убакта фазалардын номиналдуу жүктөлүшүндө туруктуу түрмөктөр аралык, мисалы фазалардын оромдорунда жабыша калмайлар пайда болду дейли. Оромдун ушул участогу менен тийишкен май, бул учурда, түрмөктүк чабылууга чейинкиге караганда катуу ысыйт, жана кошумча пайда болгон көтөрүүчү күчтүн эсебинен ысып чыккан май жогору көтөрүлөт, натыйжада оромдун үстү жагындагы майдын температурасы жогорулайт – анан ушул жогорулоо ысыктын билдиргичинде каттоого алынат [6].

Ошентип, аналог-курулма айтылып жаткан курулмадан айырмалуу, ушул курулманы орнотуу үчүн күч трансформаторун убактылуу өчүрүүнү талап кылбастан, КМТ оромдорунун түрмөктөр аралык жабыша калмайларынын мониторингин жүзөгө ашырат жана табат. Жогоруда сыпаттамаланган алгоритм боюнча иштөөчү микрокөзөмөлчүнүн программалык камсыз кылуусунда күч май трансформаторунун негизги элементтеринин (оромдору, май жана магнит өткөргүчтөр) ысуусунун жана муздоосунун математикалык модели салынган. Алар мониторинг процессинде алынган негизги элементтердин температураларынын өзгөрүүлөрүнүн айкын динамикасын моделдөөнүн натыйжалары менен салыштыруу үчүн керек. Мындай салыштыруу түрмөктүк чабылуусун табуунун ишенимдүүлүгүн жогорулатат. [7,8].

КМТ негизги элементтеринин ысуусунун жана муздоосунун математикалык моделдерин карайбыз.

Оромдордун ысуусун дифференциалдык теңдемесин интегрирлөө үчүн Matlab/Simulink чөйрөдө түзүмдүк схема курулган.

Түзүмдүк схема дифференциалдык теңдемени интегрирлөөгө жана өткөөл процесстин убактысынын ар түрдүү учурлары үчүн оромдордун өткөөл мезгилин визуалдаштырууга мүмкүнчүлүк берет [10,11].

Өчүргөндөн кийинки убакыт учурунда трансформатордо болуп жаткан айкын физикалык процесс x_1 , x_2 , x_3 көз карандысыз үч өзгөрүлмө менен биринчи ирээттеги үч дифференциалдык теңдемелердин төмөнкүдөй тутуму менен сыпатталат [12]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= -\frac{b_1}{a_1}(x_1 - x_3); \\ \frac{dx_2}{dt} &= -\frac{b_2}{a_2}(x_2 - x_3); \\ \frac{dx_3}{dt} &= \frac{b_1}{a_3}x_1 + \frac{b_2}{a_3}x_2 - \frac{b_1 + b_2 + b_3}{a_3}x_3. \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Теңдемелердин бул тутумунда (1) төмөнкүдөй белгилөөлөр киргизилген:

$$\left. \begin{aligned} m_1 c_1 &= a_1; m_2 c_2 = a_2; m_3 c_3 = a_3; \\ F_1 a_1 &= b_1; F_2 a_2 = b_2; F_3 a_3 = b_3; \\ d(\Delta \vartheta_1) &= dx_1; d(\Delta \vartheta_2) = dx_2; d(\Delta \vartheta_3) = dx_3; \\ \Delta \vartheta_1 &= x_1; \Delta \vartheta_2 = x_2; \Delta \vartheta_3 = x_3, \end{aligned} \right\}$$

Мында $\Delta \vartheta_1, \Delta \vartheta_2, \Delta \vartheta_3$ - Оромдун, магниттик өткөргүчтүн жана майдын орточо температурасынын муздатуучу чөйрөнүн температурасынан жогорулашы; m_1, m_2, m_3 жана c_1, c_2, c_3 – оромдун, магниттик өткөргүчтүн жана майдын массасы жана салыштырма жылуулугу; F_1, F_2, F_3 – оромдун, магниттик өткөргүчтүн жана майдын аянтынын үстүңкү катмары; a_1, a_2, a_3 -оромдун, магниттик өткөргүчтүн жана майдын үстүңкү катмарынын жылуулук берүү коэффициенти [7,8,9].

Биринчи ирээттеги үч дифференциалдык теңдемелердин тутуму (1) болуп саналган интеграленген математикалык моделдер, түзүмдүк схеманын жардамы менен ишке ашырылган. Мындай схеманы түзүү үчүн (1) көрүнүш төмөнкүдөй түргө кайра түзүлгөн:

$$\begin{aligned} \square x_1 &= \frac{b_2}{a_3} \frac{b_1}{a_1} \left(\frac{a_3}{b_2} + K_1 \frac{a_1}{b_1} \right) \square x_1 - \frac{b_2}{a_3} \frac{b_1}{a_1} \left(K_1 + K_2 \frac{a_1}{b_1} - \frac{b_1}{b_2} \right) \square x_1 - \\ &- \frac{b_2}{a_3} \frac{b_1}{a_1} \left(K_2 - \frac{b_1}{a_2} \right) x_1. \end{aligned} \quad (2)$$

Мында:

$$K_1 = \left(\frac{b_1 + b_2 + b_3}{b_2} + \frac{a_3}{a_2} \right), K_2 = \left(\frac{b_1 + b_2 + b_3}{a_2} - \frac{b_2}{a_2} \right)$$

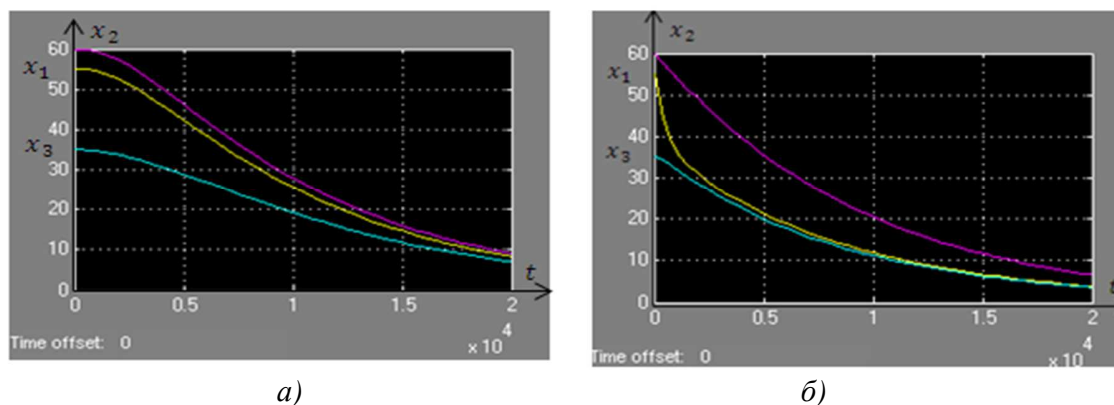
K_1, K_2 - жылуулук агымынын орточо тыгыздыгы.

Көрүнүш (2) үчүнчү даражадагы дифференциалдык теңдеме болуп саналат, ошондуктан x_1 белгисин алуу үчүн интегралдоо (Integrator) үч блогун пайдалануу менен, үч ирээт интегралдоо керек [7].

7-сүрөттө а), трансформатордун негизги элементтеринин (оромдор, магнит өткөргүч жана май) x_1, x_2, x_3 , муздоо процессинин компьютердик моделде сандык усул менен моделдөөнүн натыйжалары берилген, ал эми 7-сүрөттө б), салыштыруу үчүн аналитикалык усул менен алынган ушул эле процесстер көрсөтүлгөн.

x_1, x_2, x_3 , көз карандылыктарынын натыйжаларын талдоо, оромдордун муздоосунун алгачкы этабында, айкын күч трансформаторлорунун жылуулук процесстеринин чоң инерттүүлүгүнө карабастан, оромдордун температурасынын муздоо этабы абдан тез жүрөт деген корутунду чыгарууга мүмкүнчүлүк берет, демек муздоонун алгачкы этабында муздоону эсептөөнүн аналитикалык усулунун тактыгы жөнүндө суроо келип чыгат [7].

Ушуга байланыштуу моделдин компьютердик аналогунун (1) жардамы менен маселени талдоонун сандык ыкмасы сынуш кылынган, анткени бул усул зарыл болгондо сандык ыкманы айкындуулукка жакындатуу менен, ага жаңы блоктордун киргизилишине жараша моделдин математикалык сыпаттамасын тез алмаштырууга мүмкүнчүлүк берет.



Сүрөт 7 – Компьютердик моделде алынган x_1, x_2, x_3 көз карандылыктардын графикалык берилиши – а) жана аналитикалык метод менен – б);

x_1 – ором (сары); x_2 – магнит өткөргүч (күлгүн); x_3 – май (көгүлтүр).

Жыйынтык

Көрсөтүлгөн божомолдун жана анын адилеттүүлүгүн тастыктоонун негизинде күч май трансформаторлорунун оромдорунун түрмөктөр аралык чабылуусуна диагнос жүргүзүүнүн жаңы ыкмасы сунушталды жана Simulink/SimPowerSystems чөйрөсүндө КМТ иштөө процессинде анын табынын жогорулашын өзгөртүү процессин сүрөттөөчү моделдердин түзүмдүк схемасы иштелип чыкты.

Сунуш кылынган тутумдун иштеп жаткандардан айырмасы, кемчиликтерди иштеп чыгуунун алгачкы этабында бузулууларды аныктоого болот.

Колдонулган адабияттар

1. Мельникова О. С. Диагностика главной изоляции силовых маслонаполненных электроэнергетических трансформаторов по статистическому критерию электрической прочности масла: автореферат дис....канд. техн. наук.– Иваново, 2015.– 20 с.
2. Макарова Н. Л. Разработка метода и технических средств диагностики изоляции силовых трансформаторов сельских электрических сетей: Авторефер. дис. канд. техн. наук. – Чебоксары, 2012. – 20 с.
3. Системы мониторинга трансформаторов
4. URL:[http://www.pergam.ru/catalog/electrical equipment/monitoring transformers/Hydran.htm](http://www.pergam.ru/catalog/electrical_equipment/monitoring_transformers/Hydran.htm) – (Дата обращения 01.05.2017).
5. Руководство COMSOL Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics®. – [https://www.comsol.ru/sc/resources/pdf-offers/COMSOL_HANDBOOK_SERIES Essentials of Postprocessing and Visualization-50_RUS_high.pdf](https://www.comsol.ru/sc/resources/pdf-offers/COMSOL_HANDBOOK_SERIES_Essentials_of_Postprocessing_and_Visualization-50_RUS_high.pdf) . дата обращения (28.08.2019 г).
6. Гнидюк, А. Ф. Принципы моделирования тепловых режимов работы трансформатора //Дальневосточный ГУ. – 2013.– № 6. – С. 86-89.

7. Калматов, У. А. Диагностирование силовых трансформаторов по характеру распределения температурного поля в верхних слоях масла // Проблемы автоматики и управления. – 2019.– №1 (36). – С. 53-58.
8. Сатаркулов, К.А., Анализ процесса охлаждения силового трансформатора аналитическим и численным методом // Проблемы автоматики и управления.– 2018. – №2 (35). – С. 42–50.
9. Калматов У.А., Арфан А.Х., и др. Устройство контроля теплового состояния силового масляного трансформатора. №285. 2019. 20190020.2, Бюл. №4.
10. КИШ Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. – Москва: «Энергия», 1980. – 180 с.
11. Дьяконов, В. П. MATLAB и Simulink в электроэнергетике. – Москва: Горячая линия, 2009. – 816 с.
12. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Sim. - Москва: ДМК Пресс, 2008. –288 с.
13. Джендубаев, А.-З. MATLAB, Simulink и SimPowerSystems в электроэнергетике: учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению "Электроэнергетика и электротехника". - Чебоксары: БИЦ СевКавГГ-ТА, 2014. –136 с.

УДК 621.311.61

Брейдо И.В., jbreido@mail.ru

Каверин В.В., kaverinkz@inbox.ru

Эм Г.А., egaapp@mail.ru

Ежебаева Ш.Е., sholpanzhekeyeva@gmail.com

Карагандинский технический университет

РАЗРАБОТКА МАЛОМОЩНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ

Выполнен сравнительный анализ источников электроэнергии для питания локальных систем. Представлены результаты экспериментальных исследований наведённой энергии от токоведущих проводов в металлических элементах конструкции опор ВВЛЭП. Разработаны два варианта структурных схем автономных источников электропитания локальных систем распределённой системы диагностики.

Ключевые слова: солнечные батареи, воздушные линии электропередач, грозотрос, наведённая энергия, возмущающие факторы, локальные системы, автономные источники электропитания.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется вопросам повышения надёжности и снижению потерь в системах электроснабжения [1]. Потери в стратегических воздушных линиях электропередач в странах СНГ превышают 10% в то же время в странах евразийского экономического союза потери при транспортировке электроэнергии значительно ниже. Потери электроэнергии в высоковольтных воздушных линиях электропередач (ВВЛЭП) обусловлены многими факторами. В процессе продолжительного сотрудничества со специалистами предприятий, эксплуатирующих стратегические ВВЛЭП, определены наиболее приоритетные области научных исследований и разработки технических решений, которыми являются: снижение изоляционных свойств подвесных изоляторов, определение момента начала обледенения элементов конструкции ВВЛЭП и контроль электрохимической коррозии металлических элементов конструкции опор, расположенных под землёй. Отсутствие технических решений позволяющих диагностировать вышеперечисленные ситуации приводят к падению опор и увеличению потерь электроэнергии.

Одним из путей решения этой проблемы является создание автоматизированной системы диагностики технического состояния элементов конструкции ВВЛЭП. В процессе выполнения лабораторных исследований и промышленных испытаний элементов системы диагностики установлено, что часть электронного оборудования (измерительные датчики, контроллеры первичной обработки информации и устройства передачи телеметрической информации), должны быть расположены непосредственно на опоре ВВЛЭП.

Важнейшей задачей разработки локального блока, расположенного на опоре, является организация его электропитания. В настоящее время источники электропитания для низковольтной аппаратуры конструктивно расположенной на опорах ВВЛЭП отсутствуют. Отсутствует также информация об возмущающих факторах, оказывающих негативное влияние на стабильную работу источников электропитания. В связи с этим возникла необходимость выполнить анализ существующих типов солнечных панелей; провести экспериментальные исследования энергетических характеристик наведённой энергии в металлических элементах конструкции опор и разработать структурные схемы блоков электропитания, адаптированных к климатическим условиям резко континентального климата. Источник электропи-

тания должен обеспечивать работоспособность круглогодично в широком диапазоне температур окружающей среды и при высокой динамичности ветровой нагрузки. Источники электропитания, отвечающие вышеперечисленным требованиям, не выпускаются промышленностью. Создание экономически целесообразных автономных источников электроэнергии для питания информационной части системы диагностики на базе альтернативных источников электроэнергии или энергии электромагнитных полей токоведущих проводов стратегических ВВЛЭП является важной актуальной научно-технической задачей. Одним из путей решения этой задачи является применение возобновляемых источников электроэнергии и использования наведённой энергии от токоведущих проводов в металлических элементах конструкции опор ВВЛЭП.

В качестве возобновляемых источников электроэнергии возможно использование солнечных панелей (батарей), а также преобразователей наведённой энергии в металлических элементах конструкции опор. В работах [2, 3] представлены технические характеристики солнечных батарей (СБ) нового поколения. К преимуществам СБ следует отнести их автономность и небольшие конструктивные размеры для требуемой мощности для питания локальных систем. К недостаткам следует отнести неработоспособность СБ в тёмное время суток.

С целью оценки возможности использования наведённой энергии в металлических элементах конструкции опор portalного типа ВВЛЭП с напряжением 500 кВ для питания локальных систем, специалистами кафедры АПП КарТУ совместно со специалистами Карагандинского филиала АО КЕГОС проведены соответствующие экспериментальные исследования.

Статья подготовлена в рамках грантового финансирования по научным и (или) научно-техническим проектам на уровне МОН РК по теме № ИРН АР08856344 «Разработка комплекса удаленного мониторинга состояния элементов конструкции высоковольтных воздушных линий электропередачи в процессе эксплуатации на основе интеллектуальных помехоустойчивых телеметрических систем».

1. Материалы и методы

Важнейшими факторами при выборе солнечной батареи является её эффективность и максимальный коэффициент полезного действия (КПД) [2].

Конструктивно СБ состоят из отдельных солнечных фотоэлектрических элементов, схематически соединённых между собой для согласования энергетических характеристик с нагрузкой. В зависимости от конструкции фотоэлектрического элемента СБ наибольшую популярность получили фотоэлектрические элементы на кремниевой основе трех типов: монокристаллические (КПД до 21,5 %), поликристаллические (КПД 14-17 %) и аморфные (КПД 5-8 %) [3].

Монокристаллические кремниевые СБ эффективнее поликристаллических на 2-3 %.

В процессе совершенствования технологий к 2019 году средняя эффективность кремниевых кристаллических панелей и соответственно их средняя мощность выросла от 15 % до 20 %. При ясной солнечной погоде кремниевые элементы на 1 см² площади вырабатывает около 25 мА электрического тока при напряжении 0,5 В, в среднем 12-13 мВт/см². Если сравнивать кремниевые панели по типу, то на сегодняшний день на мировом рынке в производстве СБ наиболее широко используется фотоэлектрическая технология на основе кремния поликристаллического вида (более 60 % от общего производства СБ) [4].

Хотя монокристаллические кремниевые панели имеют отличные технические показатели, из-за более сложной технологии производства и изготовления из кремния более высокой степени очистки, данный вариант СБ по цене обходится дороже, чем остальные виды.

Для повышения эффективности фотоэлектрических элементов в СБ используют арсенид галлия (GaAs). Данный элемент имеет высокий КПД (до 28 %), кроме того практика показывает, что при высоких температурах фотоэлектрические потери ниже, чем у кремниевых солнечных панелей. Швейцарская компания INSOLIGHT к 2022 году планирует выпускать недорогие солнечные панели с КПД до 29 %. Высокий показатель эффективности достигнут посредством использования концентрирующих солнечных свет линз. Солнечные панели имеют многослойную структуру, где несколько слоев арсенида галлия совмещены с материалами из фосфида индия-галлия и германия. Данная структура позволит собирать больше солнечной энергии с единицы площади [7].

Автор в своей работе затрагивает другие технологии производства тонкопленочных фотоэлектрических элементов на основе теллурида кадмия (CdTe), медь-индий-диселенид (CuInSe_2), а также использование гибридных методов для повышения КПД солнечных панелей [5].

Как известно, СБ состоят из последовательно-параллельно соединенных фотоэлектрических элементов. Серийно выпускаемые СБ промышленностью имеют мощность от 50 до 500 Вт (при максимально ярком солнце). Эффективность СБ ниже на 1-3 %, чем представленные фотоэлектрические элементы, так как отражение стекла, затенение, высокая температура и т.д. в значительной степени влияет на техническую характеристику оборудования.

Согласно приведенным исследованиям по различным критериям (по цене, КПД, срок службы и доступности) наиболее подходящим для условий Казахстана, является кристаллические кремниевые СБ, как имеющий более высокие показатели эффективности, более доступный на рынке продаж и относительно недорогой.

В процессе длительной эксплуатации СБ выполнена классификация возмущающих факторов, снижающих их интегральные показатели энергетических характеристик. Основными возмущающими факторами для источника электропитания, выполненного на базе СБ, являются:

- суточные и годовые колебания освещённости;
- изменения освещённости, связанные с климатическими факторами (наличие плотной облачности);
- загрязнение поверхности СБ;
- налипание мокрого снега на поверхности СБ;
- изменение КПД СБ в функции температуры окружающей среды [6].

Снижение влияния возмущающих факторов на стабильность работы распределённых в пространстве систем мониторинга возможно путём установки в источниках электропитания буферного накопителя – аккумуляторной батареи или суперконденсатора.

Альтернативным техническим решением, для питания оборудования диагностики ВВЛЭП, является использование наведенной энергии в грозотросе, закреплённом на опоре воздушной линии электропередач [7].

Основными возмущающими факторами, источника электропитания локальных систем на базе наведённой энергии в грозотросе, существенно снижающими надёжность электронных блоков диагностики, установленных на опоре, являются грозовые разряды, атмосферные явления (гололедные образования) и коммутационное перенапряжение.

Гололедные образования, капли дождя и тумана, а также налипание мокрого снега, изморози приводят к дополнительной нагрузке для источника электроэнергии, наведённой в грозотросе, что приводит к уменьшению энергии отдаваемой в нагрузку, а так же повышают вероятность выхода из строя оборудования диагностики, установленного на опоре.

Коммутационные (внутренние) перенапряжения возникают при включении и отключении нагрузки с индуктивной составляющей. Переходные процессы, возникающие при коммутации, приводят к броскам напряжения в токоведущих проводах и как следствие к перенапряжениям в грозотросе.

Атмосферные перенапряжения на линиях возникают из-за грозовых явлений. При попадании молнии в участок ВВЛЭП, наиболее удаленный от заземлённого конца грозотроса, возникают переходные процессы большой амплитуды напряжения. При таких кратковременных перенапряжениях часто возникают пробой изоляционных промежутков, и в частности, перекрытие изоляции, а иногда и ее разрушение или повреждение оборудования диагностики, установленного на грозотросе.

Из всех вышеприведенных возмущающих факторов на использование наведенной энергии в грозотросе наиболее значительное влияние оказывают грозовые разряды.

В процессе разработки источников электропитания локальных систем, конструктивно расположенных на опорах ВВЛЭП, использованы методы экспериментальных исследований, теоретические основы электротехники и методы структурного построения электронных устройств.

2. Постановка задачи

В связи с тем, что конструкция опор portalного типа ВВЛЭП имеет большое количество элементов, выполненных из металла, актуальной становится задача использование энергии, наведённой в металлических элементах конструкции опор, для питания слаботочных систем диагностики. С этой целью целесообразно провести экспериментальные исследования характеристик наведённой энергии в металлических элементах конструкции опор.

Для повышения надёжности распределённого программно-аппаратного комплекса диагностики элементов конструкции ВВЛЭП, необходимо разработать различные варианты источников электропитания локальных систем сбора, первичной обработки и передачи информации на диспетчерский пункт, конструктивно расположенных на топорах ВВЛЭП. Технические характеристики источников электропитания должны быть согласованы с характеристиками локальных систем. При разработке структурных схем блоков питания должны быть, по возможности, учтены возмущающие факторы, оказывающие негативное воздействие на работу локальных систем.

3. Решение задачи

С целью оценки возможности использования наведённой энергии в оттяжках опор portalного типа, для питания локальной системы, специалистами кафедры Автоматизации производственных процессов Карагандинского технического университета (АПП КарТУ) совместно со специалистами Карагандинского филиала АО KEGOC (КФ АО KEGOC) проведены экспериментальные исследования энергетических характеристик наведённой энергии в оттяжках опор portalного типа ВВЛЭП – 500 кВ. Экспериментальные исследования проводились на линии № 5138 (Нура - Агадырь).

Измерение величины напряжения между оттяжками, расположенными с одной стороны опоры portalного типа, и тока, протекающего в них, было проведено в соответствии со схемой, представленной на рисунке 1.

В местах тросовых оттяжек, выбранных специалистами компании АО «KEGOC» и КарТУ, где будут проводиться электрические измерения, была удалена оксидная плёнка и на очищенные места, с целью обеспечения надёжного электрического контакта были закреплены клыковые зажимы типа КС (далее зажимы) 9. С помощью вольтметра 5 измерить напряжение между оттяжками, расположенными с одной стороны опоры. При этом выводы

вольтметра соединить с зажимами, расположенными на оттяжках. Ток в оттяжках измеряется с помощью амперметра клещевого типа.

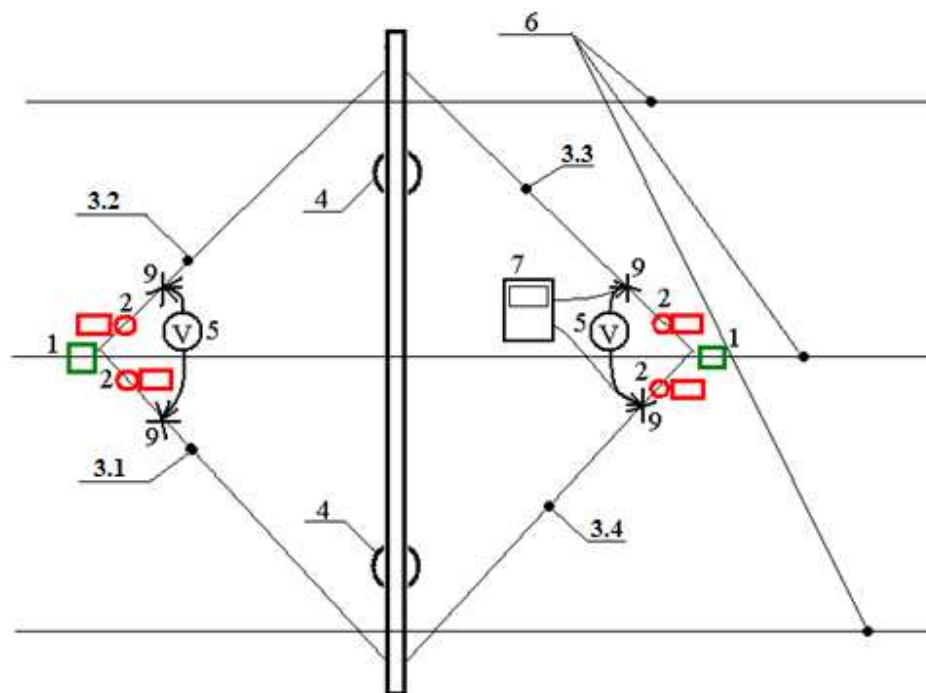


Рисунок 1 - Схема измерения напряжения между оттяжками, расположенными с одной стороны опоры.

1 – железобетонные плиты крепления тросовых оттяжек; 2 – токоизмерительные клещи; 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 – тросовые оттяжки; 4 – опоры ВЛЭП; 5 – вольтметр; 6 – токоведущие провода ВЛЭП; 7 – осциллограф; 9 – тросовые зажимы.

В процессе экспериментальных исследований проводились измерения величины тока в оттяжках и величины напряжения между оттяжками, на опорах № 247, и 253. Измерение тока проводилось посредством клещей производства фирмы АРРА.

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Статические характеристики напряжения оттяжками, расположенными с одной стороны опоры, В

№ опоры	247	253
Напряжение между 3.1 и 3.2 оттяжками, В	0,29	0,23
Напряжение между 3.3 и 3.4 оттяжками, В	0,25	0,196

Таблица 2 – Статические характеристики тока в оттяжках, мА

№ опоры	247	253
Оттяжка 3.1	16	19/15
Оттяжка 3.2	9,0	115/105
Оттяжка 3.3	5,0	145/146
Оттяжка 3.4	4,0	47/51

Среднее значение токов $I_{3.1, 3.2}$ и $I_{3.3, 3.4}$ в контуре, образуемом верхней траверсой опоры и соответственно оттяжками 3.1, 3.2 и 3.3, 3.4 определялось из следующих выражений: $I_{3.1, 3.2} = (I_{3.1} + I_{3.2})/2$; $I_{3.3, 3.4} = (I_{3.3} + I_{3.4})/2$.

Таблица 3 – Средние значения токов в оттяжках, мА

№ опоры	247	253
ІЗ.1, 3.2	12,5	127
ІЗ.3, 3.4	4,5	194,5

Зависимость напряжения между оттяжками в функции среднего значения тока в контуре, образуемом верхней траверсой опоры и оттяжками, расположенными с одной стороны опоры (далее контур), имеет вид, представленный на рисунке 2.

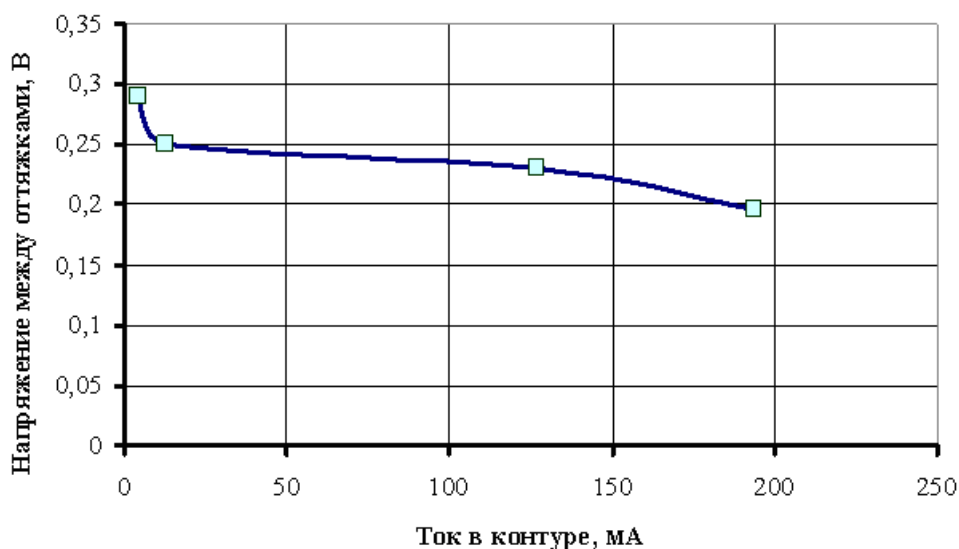


Рисунок 2 – Вольт-амперная характеристика наведённой энергии в контуре

На основании проведённого анализа различного типа солнечных батарей, их технических характеристик и возмущающих факторов, а также возмущающих факторов наведённой энергии в грозотросе, разработаны два варианта структурных схем автономных источников электроэнергии, предназначенных для питания локальных систем. В связи с тем, что локальные системы сбора первичной обработки и передачи информации на диспетчерский пункт конструктивно расположены на опоре ВЛЭП, источники электропитания используют энергию солнечного света (первый вариант) либо энергию, наведённую в грозотросе от токоведущих проводов (второй вариант).

Базовым преобразователем солнечной энергии в электрическую в первом варианте будут являться две солнечные батареи, сориентированные на юг. Структурная схема источника электропитания представлена на рисунке 3.

В связи с зависимостью энергии, вырабатываемой солнечной батареей, от угла падения солнечных лучей, решено использовать две солнечные батареи, расположенные под углом $+30^\circ$ и -30° к горизонту. Данное решение позволяет увеличить время заряда аккумуляторных батарей G1. С целью предотвращения перетоков энергии между солнечными батареями A1 и A2 при параллельном их включении, осуществлена их развязка с помощью диодов VD1 и VD2. Так как величина напряжения на выходе солнечных батарей A1 и A2 в значительной степени зависит от нагрузки, температуры окружающей среды и солнечного освещения, на выходе солнечных батарей установлен импульсный стабилизатор A3.

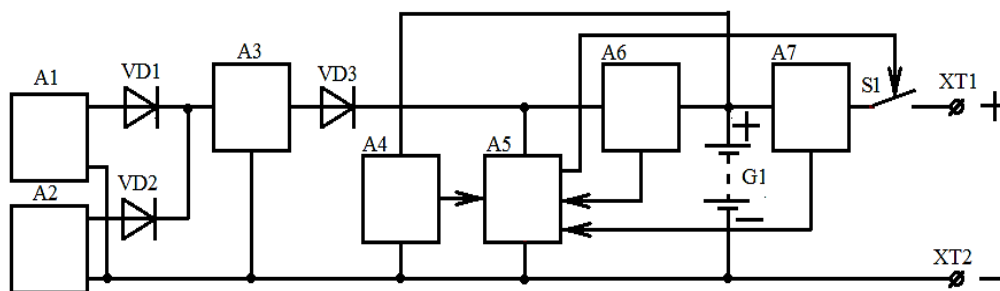


Рисунок 3 – Структурная схема блока питания на базе солнечных батарей

На выходе стабилизатора установлена аккумуляторная батарея G1, которая обеспечивает электропитанием оборудование локальной системы в тёмное время суток.

С целью предотвращения разряда аккумуляторной батареи на внутренние цепи импульсного источника электропитания между ними установлен диод VD3. Контроль за зарядом и степенью разряда аккумуляторной батареи выполняет контроллер A5. В случае разряда аккумуляторной батареи ниже допустимой нормы, нагрузка отключается посредством ключа S1. Последующее подключение нагрузки происходит только после того, как аккумуляторная батарея зарядится более чем на 50 % от ее номинальной емкости. Контроль степени заряда или разряда аккумуляторной батареи оценивается по двум параметрам: току заряда (осуществляется по разности токов с датчиков A6 и A7), напряжению на зажимах аккумуляторной батареи, которое измеряется посредством датчика напряжения A4.

Главным условием, определяющим величину ёмкости при 100 % заряженной аккумуляторной батареи, должно быть обеспечение бесперебойного электроснабжения оборудования локальной системы в течении двух суток без её дозарядки в течение этого интервала времени.

Второй вариант источника электропитания локальной системы основан на использовании энергии, наведённой в грозотросе ВЛЭП. Структурная схема источника электропитания для второго варианта представлена на рисунке 4.

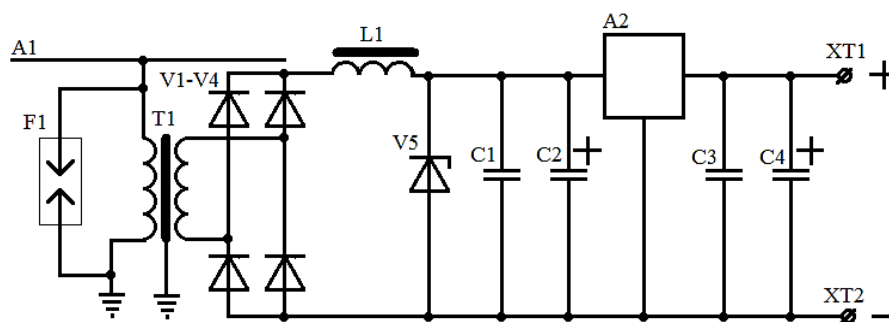


Рисунок 4 – Структурная схема источника электропитания от энергии грозотроса

Наведённая в грозотросе A1 энергия от токоведущих проводов ВЛЭП содержит, помимо напряжения промышленной частоты, кратковременные броски напряжения значительной амплитуды, вызванные коммутационными процессами и грозовыми разрядами. В настоящее время конструкцией опор предусмотрено наличие разрядников F1, которые обеспечивают частичный разряд высокого напряжения на землю. Вторичное ограничение перенапряжения осуществляется путём насыщения магнитопровода трансформатора T1. С це-

лью снижения межобмоточной ёмкости выполняется заземление магнитопровода. Конструкция трансформатора выполняется по двух катушечной схеме. Выпрямленное напряжение, посредством выпрямителя V1-V4 через токоограничивающий дроссель L1, поступает на третье звено ограничения напряжения (стабилитрон V5). В связи с тем, что наведённое в грозотросе напряжение имеет ограниченную мощность, недостаточную для питания электрооборудования локальной системы в течение 3-х минут, в качестве буферного аккумулятора С2 предлагается использовать супер-конденсаторы, выпускаемые фирмой ООО «ТПС» (Россия). С выхода супер-конденсатора напряжение поступает на импульсный стабилизатор А2 конденсаторы С3 и С4 их назначение и электрические параметры обусловлены техническими характеристиками и условиями эксплуатации импульсного стабилизатора.

В дальнейшем с целью определения технических характеристик супер-конденсатора необходимо:

- провести теоретические исследования характеристик энергии, наведённой в грозотросе;
- выбрать оборудование локальной системы и определить статические и динамические характеристики его энергопотребления.

Заключение

Таким образом, в работе выполнен анализ характеристик и условий эксплуатации и разработаны рекомендации по применению солнечных батарей.

На основании выполненного анализа технических характеристик солнечных панелей для питания локальных блоков, конструктивно расположенных на опорах воздушных линий электропередач, рекомендованы кристаллические кремниевые СБ, как имеющий более высокие показатели эффективности, большую доступность на рынке продаж и относительно невысокую стоимость.

Проведены экспериментальные исследования энергетических характеристик наведённой энергии в металлических элементах конструкции опор ВВЛЭП.

Напряжение, наведённое в контуре, образуемом оттяжками, а также верхней траверсой опоры при среднем значении тока в контуре меньше 5 мА, увеличивается до 0,3 В. При токе в контуре от 10 до 130 мА напряжение изменяется незначительно. С увеличением тока свыше 130 мА напряжение уменьшается до 0,23 В. Дальнейшее увеличение тока до величины 194 мА приводит к уменьшению напряжения до 0,196 В.

Напряжение, наводимое в контуре, определяется в основном его геометрическими размерами, пространственным расположением контура относительно токоведущих проводов ВЛЭП и магнитными характеристиками среды контура. Вышеперечисленные параметры остаются одинаковыми для всех опор portalного типа аналогичной конструкции. В связи с этим можно принять, что напряжение, наводимое в контурах других опор, будет очень близко по величине к значению 0,3 В.

С учётом возмущающих факторов энергии, наведённой в грозотросе, и характеристик СБ, влияющих на стабильность работы элементов систем мониторинга, расположенных на опорах ВВЛЭП, разработаны два варианта структурных схем источников питания локальных систем распределённого программно-аппаратного комплекса диагностики элементов конструкции ВВЛЭП.

Литература

1. Тошходжаева М.И. Повышение надежности системы электроснабжения как фактор устойчивого обеспечения народного хозяйства электроэнергией. Вестник ТГУПБП №3, 2015г., с. 71-77.
2. Виды солнечных батарей: сравнительный обзор конструкций. Электронный ресурс <https://oboiman.ru/ingeneer/sravnitelnyj-obzor-razlicnyh-vidov-solnecnyh-batarej.html> (дата обращения: 26.03.2021 г.).
3. Солнечные панели с КПД в 29%. – URL: <https://ecotechnica.com.ua/energy/solntse/3935-nedorogaya-solnechnaya-panel-s-rekordnym-kpd-v-29-rojdet-v-serijnoe-proizvodstvo.html> (дата обращения: 26.03.2021 г.).
4. Выбор солнечных панелей. – URL: <https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv/mono-or-poly-solar-panels.htm> (дата обращения: 26.03.2021 г.).
5. Бессель В.В., Кучеров В.Г., Мингалеева Р.Д. Изучение солнечных фотоэлектрических элементов: учебно-методическое пособие. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, 2016. – 90 с.
6. Ramadan J.M., Mohamed R.G., Mujahed Al-Dhaifallah, Hegazy R. Environmental Impacts on the Performance of Solar Photovoltaic Systems. Sustainability. 2020, 12, 608; URL <https://www.mdpi.com/pdf> (дата обращения: 26.03.2021 г.).
7. Каверин В.В., Эм Г.А., Байц В.Е., Имангалиева К.Ж., Ежебаева Ш.Е. Исследование характеристик энергии, наведённой в грозотросе высоковольтных воздушных линий электропередач. Автоматика и информатика. - КарТУ 2020, №1, с. 20-27.

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 517.93

Оморов Р.О., д.т.н., член-корреспондент НАН КР, romano_ip@list.ru
*Институт машиноведения и автоматизации Национальной академии наук
Кыргызской Республики, Бишкек*

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ГРУБОСТЬ СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассматриваются основные положения метода исследования грубости динамических систем, основанного на понятии грубости по Андронову-Понтрягину и именуемого «методом топологической грубости». Приведены определения понятий «максимальной грубости» и «минимальной негрубости» динамических систем. Сформулированы соответствующие теоремы о необходимых и достаточных условиях достижимости максимальной грубости и минимальной негрубости, а также возникновения бифуркаций топологических структур динамических систем, которые были доказаны в работах автора, приведенных в списке литературы. Метод позволяет управлять грубостью систем управления на основе теоремы, сформулированной с использованием матричного уравнения Сильвестра. Метод может быть использован для исследований грубости и бифуркаций динамических систем, а также синергетических систем и хаоса различной физической природы. В работах автора метод апробирован на примерах многих синергетических систем, таких, как аттракторы Лоренца и Рёсслера, систем Белоусова-Жаботинского, Чуа, «хищник-жертва», Хенона, бифуркации Хопфа, экономических систем Калдора и Шумпетера и др. Приложения метода проиллюстрированы на примере синергетической системы Чуа.

Ключевые слова: динамическая система; топологическая грубость; синергетическая система и хаос; грубость по Андронову-Понтрягину; бифуркация; максимальная грубость; минимальная негрубость систем; гиперболические особые точки.

Введение. Проблемам исследования грубости динамических систем, оценки робастности и синтеза грубых (робастных) систем управления уделяется большое внимание в современной теории динамических систем и теории управления [1-4].

В теории динамических систем существуют два различных подхода к проблеме грубости: 1) на основе понятия грубости по Пейксоту, или иначе «структурной устойчивости»; 2) на основе понятия грубости по Андронову - Понтрягину, когда в отличие от предыдущего требуется ε -близость исходной и возмущенного гомеоморфизмов [1, 2, 5].

В работе [6] на базе понятия грубости по Андронову-Понтрягину были заложены основы «метода топологической грубости», который позволяет исследовать грубость и бифуркации динамических систем различной природы, в частности синергетических систем, а также синтезировать грубые (робастные) системы управления [7].

В данной статье представлены основные положения «метода топологической грубости», разработанного автором, а также приложения этого метода к синергетической системе Чуа [8].

Основы метода. В классической постановке вопросы грубости и бифуркаций систем были поставлены еще на заре становления топологии как нового научного направления математики великим французским ученым А. Пуанкаре [9], в частности, термин «бифуркация» впервые введен им и означает дословно «раздвоение», или иначе от решений уравнений динамических систем ответвляются новые решения. «Грубость» динамических систем при этом определяется как свойство систем сохранять качественную картину разбиения фазового пространства на траектории при малом возмущении топологий при рассмотрении близких по виду уравнений систем.

В современной терминологии «бифуркация» употребляется как название любого скачкообразного изменения, происходящего при плавном изменении параметров в любой системе. Таким образом, бифуркация означает переход между пространствами грубых систем.

Переход между грубыми системами осуществляется через негрубые области (пространства). Многие основополагающие результаты в теории грубости и бифуркации получены А.А. Андроновым и его школой [1, 2].

В работе [1] впервые дано понятие грубости и сформулированы качественные критерии грубости, которое впоследствии названо понятием грубости по Андронову-Понтрягину [2].

В многомерной постановке рассматривается динамическая система (ДС) n -го порядка

$$\dot{z}(t) = F(z(t)), \quad (1)$$

где $z(t) \in R^n$ – вектор фазовых координат, F – n -мерная дифференцируемая вектор-функция.

Система (1) называется топологически грубой по Андронову-Понтрягину в некоторой области G , если исходная система и возмущенная система, определенная в подобласти \tilde{G} , области G :

$$\dot{\tilde{z}} = F(\tilde{z}) + f(\tilde{z}), \quad (2)$$

являются \mathcal{E} – тождественными в топологическом смысле.

Системы (1) и (2) \mathcal{E} – тождественны, если существуют открытые области D , \tilde{D} в n -мерном фазовом пространстве также, что $D \subset \tilde{D} \subset \tilde{G} \subset G$

$$\begin{array}{ll} \text{если} & \begin{array}{l} \exists \varepsilon, \delta > 0: \\ \|f(\tilde{z})\| < \delta, \\ |df_i(\tilde{z})/d\tilde{z}_j| < \delta, \quad i, j = \overline{1, n}, \end{array} \\ \text{то} & \begin{array}{l} \|\tilde{z}\| - \|z\| < \varepsilon, \text{ или} \\ (\tilde{D}, (2)) \overset{\varepsilon}{\equiv} (D, (1)), \end{array} \end{array} \quad (3)$$

иначе разбиение областей \tilde{D} и D траекториями систем (2) и (1) \mathcal{E} – тождественны (имеют одинаковые топологические структуры с траекториями близкими до ε).

Если (3) не выполняется, то система (1) негруба по Андронову-Понтрягину.

Топологическая структура динамических систем определяется особыми траекториями и многообразиями типа особых точек, особых линий (сепаратрис), замкнутых (периодических) траекторий, притягивающих многообразий (аттракторов).

В работе [6] на основе понятия грубости по Андронову-Понтрягину предложены основы «метода топологической грубости» с использованием меры грубости в виде числа обусловленности $C\{M\}$ – нормированной матрицы M , приведения системы каноническому диагональному (квазидиагональному) виду в особых точках фазового пространства. Здесь же впервые введено понятие максимальной грубости и минимальной негрубости на отношениях пары δ и ε .

Определение 1. Грубая в области G система (1) называется максимально грубой на множестве топологически тождественных друг другу систем N , если величина δ – близости систем (1) и (2), приводящая к ε -тождественности, будет (для каждого $\varepsilon > 0$) максимальной.

Определение 2. Негрубая в области G система (1) называется минимально негрубой на множестве топологически тождественных друг другу систем N , если величина ε -тождественности систем (1) и (2), при которой еще выполняется условие грубости, будет (для каждого $\delta > 0$) минимальна.

Условие достижимости максимальной грубости и минимальной негрубости в окрестности особых точек фазового пространства определяется следующей теоремой, доказанной в работе [6].

Теорема 1. Для того чтобы динамическая система в окрестности гиперболической особой точки (z_0) была максимально грубой, а в окрестности негиперболической – минимально негрубой, необходимо и достаточно иметь:

$$M^* = \operatorname{argmin} C\{M\},$$

где M – матрица приведения линейной части A системы (1) в особой точке (z_0) к диагональному (квазидиагональному) базису, $C\{M\}$ – число обусловленности матрицы M .

Замечание 1. Как следует из определений 1 и 2, а также теоремы 1, существуют и минимально грубые, и максимально негрубые системы, для которых $C\{M\} = \infty$. Иначе множество грубых и негрубых систем образуют непрерывные множества со значениями $C\{M\}$ от 1 до ∞ . При этом системами с $C\{M\} = \infty$ будут системы с жордановой квазидиагональной формой матриц линейного приближения A .

Очевидно, число обусловленности $C\{M\}$ как меру грубости можно использовать для кусочно-гладких динамических систем, рассматривая совокупную грубость по областям гладкости системы, если особые точки не находятся на границе этих областей. Следует отметить, что для негладких систем, используя какую-либо обобщенную производную из негладкого анализа при определении матрицы линейной части, можно обобщить эту меру грубости.

Теоретические результаты «метода топологической грубости», полученные в работах [6-8], позволяют управлять грубостью синергетических систем, в соответствии с теоремой, доказанной в работе [6].

Рассматривается система

$$\dot{z} = Q(z, u), \quad (4)$$

где $z \in R^n$, $u \in R^r$ – соответственно вектора фазовых координат и управлений системы, $Q(\cdot)$ – n -мерная нелинейная дифференцируемая вектор-функция.

Возможности управления грубостью определяются условиями следующей теоремы.

Теорема 2. Для того, чтобы в управляемой динамической системе (4), описываемой в n -мерном фазовом пространстве с помощью матриц линейного приближения A , B соответственно для фазовых координат и управлений, существовало управление $u(t)$, обеспечивающее в окрестности соответствующей особой точки замкнутой системы максимальную грубость или минимальную негрубость, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись условия невырожденной разрешимости матричного уравнения Сильвестра.

Управление $u = u(t) \in U$ ищется в классе систем с обратной связью $u = -Kx$, такое, что матрица замкнутой системы $F = A - BK$, вблизи особых траекторий, в частности особых точек, удовлетворяет условиям

$$G(F) = G(\Gamma), \quad M\Gamma - A M = -B H, \quad K = H M^{-1},$$

где $\Gamma \in R^{n \times n}$ – диагональная (квазидиагональная) матрица состояния канонической модели, $H \in R^{m \times n}$ – матрица, задаваемая произвольно с ограничением на наблюдаемость пары (Γ, H) , $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$ – матрицы координат и управления;

Вблизи особой точки:

$$F(z) = 0, \quad \dot{z} = Az + Bu,$$

управление $u = u(t) \in U$ синтезируется так, чтобы достичь требуемого значения показателя $C\{M\}$, используя какие-либо методы нелинейного программирования [10].

Метод топологической грубости также позволяет определять бифуркации динамических систем на основе критериев, разработанных в работах [6-8]. Более того, метод представляет возможности прогнозирования бифуркаций, а также управления параметрами бифуркаций [11].

Теорема 3. Для того чтобы в области G многомерной ($n > 2$) ДС при значении параметра $q = q^*$, $q \in R^p$ возникла какая-нибудь бифуркация топологической структуры, необходимо и достаточно, чтобы:

- либо 1), в рассматриваемой области G , ДС существуют негиперболические (негрубые) особые точки (ОТ), или орбитально-неустойчивые предельные циклы (ПЦ), для которых имеет место равенство

$$C\{M(q^*)\} = \min \sum_{i=1}^p C_i\{M(q)\}, \quad (5)$$

где p – количество ОТ или ПЦ в области G ,

- либо 2), в области G ДС имеются какие-либо грубые ОТ или ПЦ, для которых выполняется условие

$$C\{M(q^*)\} = \infty. \quad (6)$$

Замечание 2. Тип бифуркации зависит, во-первых, от того, какое из условий (5) или (6) выполняется, во-вторых, от того, какая особая траектория – ОТ или ПЦ, удовлетворяет этим условиям. Так, например, хаотические колебания («странные аттракторы»), возникающие из-за потери симметрии, происходят, когда условию (5) удовлетворяют ОТ, а хаотические колебания, возникающие через последовательности бифуркаций удвоения периода, происходят в том случае, когда условию (5) отвечают ПЦ.

Синергетика. В современной науке возрастает интерес к ее объединяющим направлениям, рассматривающим явления природы и общества, живой и неживой природы с единых точек зрения в зависимости от проявляемых ими свойств и характеристик. К одному из таких направлений науки относится синергетика, которая занимается самоорганизующимися процессами, явлениями и системами [12 – 14].

Синергетика в настоящее время вторгается во все области науки, начиная с естественных наук – физики, химии, биологии, геологии, геофизики и кончая неточными областями

наук, такими, как экономика, социология, психология, философия, распознавание образов, а также в области техники и технологий [7, 8, 12-20].

При исследовании и управлении синергетическими системами важнейшее значение имеют вопросы грубости и бифуркаций. Одним из методов в изучении свойств грубости и бифуркаций синергетических систем, а также управления этими свойствами служит «метод топологической грубости», основы которого изложены выше.

Далее в работе возможности метода проиллюстрированы на примере широко известной синергетической системы Чуа [18].

Иллюстрация приложений метода к синергетической системе Чуа

Система (цепь) Чуа [18].

Как известно, система Чуа представляет собой электронную цепь с одним нелинейным элементом, которая способна генерировать разнообразные, в частности, хаотические колебания.

Система Чуа описывается уравнениями:

$$\dot{x} = p(y - f(x)), \dot{y} = x - y + z, \dot{z} = -qy, \quad (7)$$

где $f(x) = M_1 x + 0.5(M_1 - M_0)(|x + 1| - |x - 1|)$.

При $p = 9$, $q = 14.3$, $M_1 = -6/7$, $M_0 = 5/7$ в системе (7) наблюдаются хаотические колебания.

В данном случае три особые точки (ОТ): $ОТ_1(0,0,0)$; $ОТ_{2,3}(\pm 11/6, 0, 11/6)$.

Исследованиями установлены (см. рисунок), что хаотические движения обнаруживаются при значениях q : $-1.034 < q < -0.49$, а при $q = -3.8$ и $q = 1.05$ наблюдается максимальная грубость движений в системе (7).

Заключение. Рассмотренные в данной статье основные положения «метода топологической грубости», разработанного автором на базе понятия грубости по Андронову-Понтрягину, являются методом количественного исследования грубости и бифуркаций динамических систем самого широкого класса и различной физической природы. Возможности метода для исследований грубости и бифуркаций систем показаны на примере синергетической системы Чуа, но в работах автора [7, 8] и др. метод апробирован для

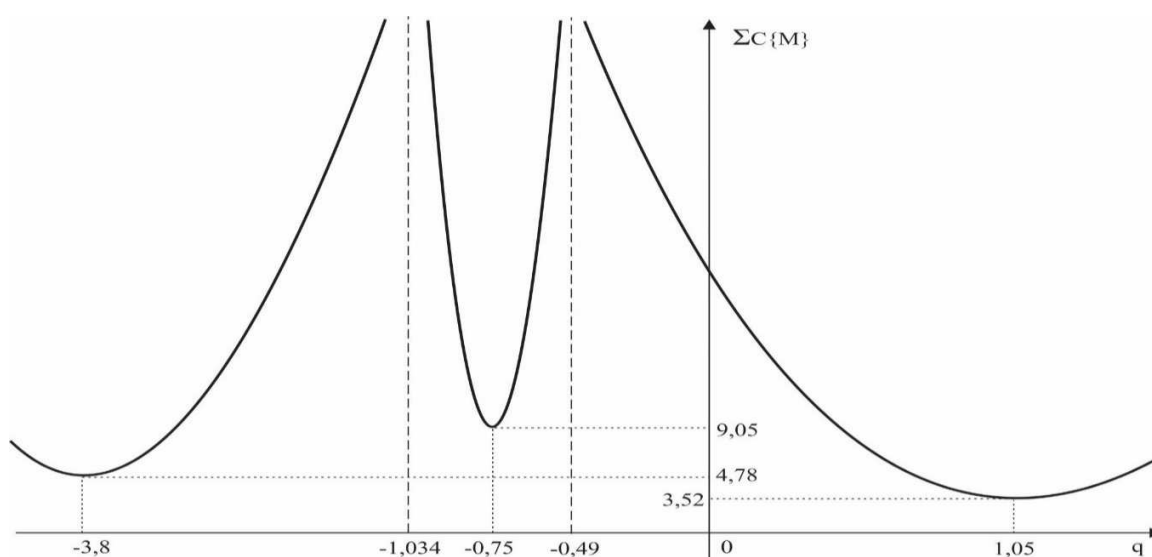


Рисунок – Зависимость $C\{M\}$ от параметра q в системе Чуа.

исследований синергетических систем Лоренца, Рёсслера, «хищник-жертва», динамо Рикитакэ, отображений Хенона, бифуркаций Хопфа, моделях экономических систем типа Шумпетера и Калдора и др. При этом результаты метода, полученные на вышеперечисленных системах, согласуются с известными результатами других исследователей этих систем. Отметим, что метод может быть использован для исследований как других синергетических систем и хаоса в этих системах, так и для исследований динамических систем более широкого класса, в частности, при исследованиях колебательных систем и бифуркаций Хопфа, а также аттракторов дискретных отображений [7, 8, 12 - 20].

Литература

1. Андронов А.А., Понтрягин Л.С. Грубые системы // Докл. АН СССР. – 1937. – Т.14. – №5. – С. 247–250.
2. Аносов Д.В. Грубые системы // Топология, обыкновенные дифференциальные уравнения, динамические системы: Сборник обзорных статей. 2. К 50-летию института (Труды .МИАН СССР.Т.169). – М.: Наука, 1985. – С. 59 –93.
3. Поляк Б.Т., Цыпкин Я.З. Робастная устойчивость линейных систем // Итоги науки и техники. Сер. Техническая кибернетика. –Т. 32. – М.: ВИНТИ, 1991. – С. 3–31.
4. Оморев Р.О., Ушаков А.В. Оценки робастности в задачах управления и наблюдения // Изв. вузов. Электромеханика. – 1991. – № 1. – С. 78–85.
5. Peixoto M.M. On structural stability // Ann. Math. 1959. – Vol. 69. –No. 1. – P. 199–222.
6. Оморев Р.О. Максимальная грубость динамических систем // А и Т. 1991. – № 8. – С. 36–45; Omorov R.O. Maximal coarseness of dynamical systems // Automation and Remote Control. 1992. – V. 52. – No 8 pt 1. – P. 1061–1068.
7. Оморев Р.О. Топологическая грубость синергетических систем // Проблемы управления и информатики. –2012. –№ 2. – С. 5–12; Omorov R.O. Topological Roughness of Synergetic Systems // Journal of Automation and Information Sciences. 2012. – V. 44. – P. 61–70.
8. Оморев Р.О. Теория топологической грубости систем. – Бишкек: Илим, 2019. – 288 с.
9. Пуанкаре А. О кривых определяемых дифференциальными уравнениями / Пер. с франц. под ред. А.А.Андропова. – М.–Л.: Гостехиздат, 1947. – 392 с.
10. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 534 с.
11. Оморев, Р.О. Количественные меры грубости динамических систем и их приложения к системам управления. Диссертация... на соискание ученой степени доктора технических наук. – СПб.: Санкт-Петербургский институт точной механики и оптики, 1992. – 188 с.
12. Хакен Г. Синергетика: иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 423 с.
13. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного: Введение/Пер. с англ. – М.: Мир,1990. – 342 с.

14. Странные аттракторы / Сб. пер. с англ. под ред. Я.Г. Синая, Л.П. Шильникова. – М.: Мир, 1981. – 253 с.
15. Занг В.Б. Синергетическая экономика. Время и перемены в нелинейной экономической теории / Пер. с англ. – М.: Мир, 1999. – 335 с.
16. Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика и прогнозы будущего. 2-е изд. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 288 с.
17. Леонов Г.А., Кузнецов Н.В., Кудряшова Е.В. Тунис 2011-2014. Бифуркация, революция и управляемая стабилизация // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2016. – № 4. – С. 92–103.
18. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Управление хаосом: методы и приложения. I. Методы // А и Т. 2003. – № 5. – С. 3–45; Andrievsky B.R., Fradkov A.L. Control of Chaos: Methods and Applications. I. Methods // Automation and Remote Control. 2003. – V. 64. – No 5. – P. 678–720.
19. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного синтеза. Изд-е 2-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. – 240 с.
20. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров/ Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 312 с.

УДК 62-50

РОБАСТНОСТЬ ИНТЕРВАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ: УСТОЙЧИВОСТЬ И ЭЛЛИПСОИДНЫЕ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА

Оморов Р.О., д.т.н., член-корреспондент НАН КР, romano_ip@list.ru

Акунов Т.А., к.т.н.

Институт машиноведения и автоматизации Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызская Республика

Рассматривается алгебраический метод исследований робастной устойчивости непрерывных и дискретных интервальных динамических систем, а также метод эллипсоидных оценок качества многомерных систем управления. Как известно, основоположником алгебраического направления исследований робастности интервальных систем является российский, советский ученый В.Л. Харитонов. Им было установлено, что для устойчивости интервального полинома необходима и достаточна устойчивость лишь четырех угловых полиномов семейства, которые теперь носят название полиномов Харитонova. В данной работе представлены оригинальные результаты, полученные для исследования устойчивости непрерывных и дискретных линейных интервальных динамических систем, названные алгебраическим методом робастной устойчивости. Приведены основные результаты рассматриваемого метода для интервальных систем как в непрерывном, так и в дискретном времени. В случае дискретных систем получен дискретный аналог теоремы Харитонova. Для исследования качественных свойств многомерных систем управления предложены эллипсоидные оценки качества, основанные на мажорантных и минорантных оценках сингулярных чисел, соответствующих критериальным матрицам этих свойств. Вычислительный аппарат определения эллипсоидных оценок построен на базе сингулярного разложения матриц с использованием стандартных SVD-процедур разложения матриц. Приведены базовые концепции метода эллипсоидных оценок.

Ключевые слова: интервальная динамическая система; робастная устойчивость; угловые полиномы Харитонova; интервальная матрица; многогранник матриц; дискретный аналог теоремы Харитонova; точка и интервал перемежаемости; эллипсоидные оценки качества многомерных систем; сингулярное разложение матриц; SVD-процедуры разложения матриц.

Введение. Вопросам робастности и грубости динамических систем в современной науке уделяется все больше внимания [1 - 9]. Интерес, который привлекает проблемы робастности и грубости в различных областях науки и техники, связан с тем, что эти понятия относятся к важнейшим свойствам систем, рассматриваемым при их реальном функционировании.

Что касается непосредственно систем управления, то в настоящее время наиболее рассмотрены и решены вопросы робастной устойчивости, что связано прежде всего с основополагающими результатами В.Л. Харитонova, в которых решены вопросы робастной устойчивости для интервальных полиномов [10].

К настоящему времени недостаточно рассмотрены вопросы построения робастных и грубых нелинейных систем управления. При этом для инженерных применений следует отметить, что на практике модели и параметры возмущений могут быть не только известны, но и неопределены [11-13].

В теории робастной устойчивости решены многие задачи, это прежде всего реберная теорема и дискретные аналоги и варианты теорем Харитонova. Советскими и российскими учеными – Я.З. Цыпкиным, Б.Т. Поляком, Ю.И. Неймарком – разработаны частотные критерии робастной устойчивости типа Михайлова, Найквиста, D -разбиения [8, 14-16].

В алгебраическом направлении исследований робастности систем управления получены оригинальные результаты касательно не только свойства устойчивости, но и других

свойств качества систем (быстродействия, перерегулирования, точности и др.), которые основаны на использовании модальных оценок качества процессов, в современной терминологии именуемые эллипсоидными оценками [17-19].

В настоящей работе рассматривается *алгебраический метод* исследования робастности как непрерывных, так и дискретных интервальных динамических систем, основы которых заложены в работах [17-22]. При этом ввиду ограниченности объема работы вопросы эллипсоидных оценок представлены базовыми концепциями.

I. Алгебраический метод робастной устойчивости. Рассматриваются линейные динамические системы порядка n ,
непрерывная

$$\dot{x}(t) = Ax(t), x(t_0) = x_0, \quad (1)$$

и дискретная

$$x(m+1) = Ax(m), m = 1, 2, 3, \dots, \quad (2)$$

где $x = x(t) \in R^n$, $x(m)$ – вектора состояния, $A \in R^{n \times n}$ – интервальная матрица с элементами $a_{ij}, i, j = \overline{1, n}$, представляющие интервальные величины $a_{ij} \in [\underline{a}_{ij}, \overline{a}_{ij}]$ с угловыми значениями $\underline{a}_{ij}, \overline{a}_{ij}, \underline{a}_{ij} \leq \overline{a}_{ij}$.

Требуется определить условия робастной устойчивости систем (1) и (2).

Непрерывные системы. В базовых для рассматриваемого метода работах [21, 22] получены результаты в виде строго доказанных теоремы 1 и леммы к ней о робастной устойчивости системы (1) по условиям гурвицевости четырех угловых полиномов Харитонова, составленным по последовательным сепаратным угловым коэффициентам $b_i, (\underline{b}_i, \overline{b}_i, i = \overline{1, n})$ характеристических полиномов системы (1):

$$f(\lambda) = \lambda^n + b_1 \lambda^{n-1} + \dots + b_n = 0. \quad (3)$$

Приведем эти теорему 1 и лемму.

Теорема 1. Для того чтобы положение равновесия $x=0$ системы (1) было асимптотически устойчиво при всех $A \in D$ или чтобы интервальная матрица A была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы были гурвицевы все четыре угловых полинома Харитонова, составленные по последовательным сепаратным угловым коэффициентам $b_i, (\underline{b}_i, \overline{b}_i, i = \overline{1, n})$ характеристических полиномов (3) системы (1).

Данная теорема доказана на основе следующей леммы.

Лемма. Сепаратные угловые коэффициенты $b_i, (\underline{b}_i, \overline{b}_i, i = \overline{1, n})$ образуются как соответствующие коэффициенты полиномов (3), либо при угловых значениях элементов $a_{ij}, i, j = \overline{1, n}$, матрицы A , либо при нулевых значениях некоторых элементов (если интервал принадлежности включает нуль).

Как нетрудно видеть из леммы, для нахождения коэффициентов $b_i, (\underline{b}_i, \overline{b}_i, i = \overline{1, n})$, в общем случае необходимо применение оптимизационных методов нелинейного программирования.

К теореме 1, доказательство которой приведено в приложениях работ [21], необходимо сделать следующее уточняющее замечание.

Замечание. Из основного аргумента доказательства теоремы 1, связанного с наличием четырех угловых полиномов Харитонов, следует, что при отсутствии полного множества (набора) из четырех угловых полиномов условия теоремы 1 необходимы, но могут быть недостаточны для устойчивости системы (1).

Случай, соответствующий приведенному **замечанию**, может возникнуть тогда, когда сепаратные угловые коэффициенты полиномов (3) взаимосвязаны и в итоге сужают набор угловых коэффициентов до количества менее четырех.

Справедливость доказанной теоремы 1 подтверждается аннулированием известных контрпримеров к теореме Биаласа [19, 23].

Теорема 1 и лемма позволяют решить задачу о реберной гипотезе для многогранников матриц [3, 19].

Противоречия в реберной гипотезе [3] разрешены на основе следующей реберной теоремы 2, доказанной в работе [21].

Теорема 2. Для устойчивости многогранника матриц \mathbf{P} необходимо и достаточно, чтобы выпуклые ребра \mathbf{P} были устойчивы, т.е. матрица

$$s_1 \mathbf{P}_i + s_2 \mathbf{P}_j, \quad (4)$$

устойчива при любых $i, j = \overline{1, m}, s_1 \in [-1, 0], s_2 \in [0, 1]$.

В данном случае многогранник матриц \mathbf{P} представлен в виде:

$$\mathbf{P} = \left\{ \mathbf{P}_s = \mathbf{P}_{s1} + \mathbf{P}_{s2} : \mathbf{P}_{s1} = \sum_{i=1}^m s_{1i} \mathbf{P}_i, \mathbf{P}_{s2} = \sum_{i=1}^m s_{2i} \mathbf{P}_i : s_{1i} + s_{2i} = s_i \geq 0, i = \overline{1, m}, \sum_1^m s_i = 1 \right\} \quad (5)$$

Справедливость теоремы 2 также подтверждается аннулированием всех известных контрпримеров из работы [24].

Дискретные системы. Как известно, публикация работы [10] дала импульс для поиска многими исследователями дискретных аналогов теорем Харитонova [3, 7, 22, 25-27]. Так, в работе [3] указано, что «дискретный вариант харитоновского условия четырех многочленов отсутствует». Но здесь же отмечается, что в настоящее время получены [25] дискретные аналоги слабой и сильной теорем Харитонova. Но эти аналоги теорем Харитонova имеют определенные ограничения, накладываемые на интервальные области коэффициентов [3]. Эти ограничения были сняты в работах [22, 27], где получены аналоги теорем Харитонova с использованием теоремы Шура [28]. Также в [22, 27] сформулированы теоремы, являющиеся дискретными аналогами результатов работы [10] по интервальным матрицам и многогранникам матриц.

Далее рассматривается обобщение результатов, полученных в работе [22], с учетом выводов, приведенных выше, для непрерывных систем.

Для дискретных систем, используя z -преобразование, получаем интервальный характеристический полином

$$f(z) = \det(z\mathbf{I} - \mathbf{A}) = \sum_{i=0}^n b_i z^{n-i}, b_i \in [\underline{b}_i, \bar{b}_i], \underline{b}_i \leq \bar{b}_i. \quad (6)$$

Для определения условий устойчивости воспользуемся теоремой Шура [28], т.е. условиями вида

$$|b_0| > |b_n|, \quad (7)$$

для последовательности полиномов, определяемых рекуррентными соотношениями

$$f_i(z) = [b_0 f(z) - b_n f(1/z) z^n] / z, \dots, f_{i+1}(z) = [b_{0,i} f_i(z) - b_{n,i} f_i(1/z) z^{n-1}] / z, \quad (8)$$

где $b_{0,i}, b_{n,i}$ – соответственно старший и младший коэффициенты i -го ($i = \overline{1, n-2}$) полинома $f_i(z)$.

Определение 1. Точками перемежаемости для коэффициентов $b_i, i = \overline{0, n}$ будем называть точки на действительной оси, в которых происходят переходы корней полинома (6), через единичную окружность на плоскости корней, а интервалами перемежаемости – соответственно интервалы, в которых корни находятся либо внутри, либо вне единичного круга.

В работах [19, 22] сформулированы основные результаты по определению условий робастной устойчивости дискретных интервальных систем.

Справедливость результатов [21, 22] относительно аналога сильной теоремы Харитона продемонстрирована на известных контрпримерах из [3, 25, 26] и др.

Алгоритм определения робастной устойчивости дискретных интервальных динамических систем будет следующим.

1. Пользуясь формулами леммы к теореме 1 [22], оптимизацией по элементам

$a_{ij} \in [\underline{a}_{ij}, \overline{a}_{ij}], i, j = \overline{1, n}$, интервальной матрицы \mathbf{A} , находятся сепаратные угловые коэффициенты $b_i \in [\underline{b}_i, \overline{b}_i], i = \overline{0, n}$, интервального характеристического полинома (6).

2. Определяются четыре полинома Харитона, соответствующие интервальному полиному (6)

$$\begin{aligned} f_1(z) &: \{\underline{b}_0, \underline{b}_1, \overline{b}_2, \overline{b}_3, \underline{b}_4, \dots\}, f_2(z) : \{\underline{b}_0, \overline{b}_1, \overline{b}_2, \underline{b}_3, \underline{b}_4, \dots\}; \\ f_3(z) &: \{\overline{b}_0, \underline{b}_1, \underline{b}_2, \overline{b}_3, \underline{b}_4, \dots\}, f_4(z) : \{\overline{b}_0, \overline{b}_1, \underline{b}_2, \underline{b}_3, \overline{b}_4, \dots\}; \end{aligned}$$

3. Составляются n -неравенства вида (П.2), указанные в Приложении работы [22].

4. Относительно каждого коэффициента $b_i, i = \overline{0, n}$, считая остальные коэффициенты фиксированными, последовательно находятся точки перемежаемости для всех четырех полиномов Харитона и по всем n -неравенствам (см. п.3), начиная с меньших порядков.

5. Если все точки перемежаемости по всем коэффициентам $b_i, i = \overline{0, n}$, не принадлежат заданным интервалам, то исходный полином (система) устойчив в противном случае неустойчив.

II. Эллипсоидные оценки качества многомерных систем управления с интервальными параметрами. Как известно, основные показатели качества такие, как время переходного процесса, перерегулирование, коэффициенты ошибки, добротности, показатель колебательности, дисперсия ошибки выходной величины, полосы пропускания на уровне заданных значений частотных характеристик и спектральных плотностей и др. сформулированы в теории и практике одномерных систем. Логично желание перенесения этих показателей на случай многомерных систем. Однако в случае многомерных систем возникают проблемы, связанные со структурой пространства оператора, реализуемого многомерной системой. Использование показателей качества систем, разработанных в теории одномерных систем, может быть осуществлено только путем скаляризации векторных процессов [17]. Простейшим способом скаляризации является использование их норм. Однако при таком способе скаляризации может быть упущен учет специфики многомерных процессов. В этой связи авторы предпочли использование аппарата эллипсоидных оценок качества, который в

рамках предлагаемого ниже подхода приводит к мажорантной и минорантной оценкам основных показателей многомерных процессов, используемых в теории одномерных систем [17, 18]. При этом даже в одномерном случае часть показателей носит явно мажорантный и минорантный характеры, порождаемые отношениями порядка типа “не больше” и “не меньше”. Очевидно, для случая интервальных многомерных систем все эти показатели будут носить интервальный характер.

Матричные способы описания динамики и алгебраические методы исследования обусловили в последнее время широкое использование сингулярного разложения матриц в теории многомерных систем [17, 18, 29, 30]. Сингулярное разложение матриц является эффективным аппаратом линейной алгебры, а с появлением SVD-процедуры стало мощным вычислительным средством для решения задач, связанных с матрицами [29, 31–34]. Интерес к сингулярному разложению вызван связью сингулярных чисел с нормами матриц, свойствами матричных компонентов разложения, а также возможностью использования информации, заложенной в компонентах сингулярного разложения в задачах анализа и синтеза систем управления. Таким образом, сформировалось направление в теории многомерных систем, основанное на SVD-подходе.

Использование в качестве инструментария SVD-разложения матриц позволило ввести в рассмотрение скалярные показатели качества векторных процессов в многомерных системах, аналогичных показателям качества для одномерных систем в форме мажорант и минорант и именуемых *эллипсоидными* в силу прозрачной геометрической интерпретируемости в виде отображения сферы в эллипсоид. Использование свойств компонентов сингулярного разложения матриц в линейной алгебраической задаче позволяет определить условия, порождающие заданные эллипсоидные показатели качества векторных процессов в многомерных системах.

Базовые концепции формирования эллипсоидных оценок. Методологическая основа эллипсоидного оценивания многомерных процессов, использующего свойства компонентов сингулярного разложения матриц, опирается на систему алгебраических концепций, приведенных ниже.

Концепция 1. Пусть задача исследования многомерных систем управления сводится к векторно-матричному представлению, параметризованному скаляром τ

$$\kappa(\tau) = \Pi(\tau)\chi(\tau), \quad \forall \tau, \quad \tau = t, k; \quad \omega \quad (9)$$

где $\kappa \in R^{\rho}$, $\chi \in R^{\nu}$; $\Pi \in R^{\rho \times \nu}$ – некоторая критериальная матрица, τ может принимать смысл непрерывного времени t в случае исследования непрерывных многомерных управляемых процессов и смысл дискретного времени k , выраженного в числе интервалов дискретности длительностью Δt так, что непрерывное время t и дискретное k связаны соотношением $t = \Delta t k$ в случае исследования дискретных многомерных управляемых процессов, ω – частота источника внешнего гармонического воздействия. Пусть матрица $\Pi(\tau)$ имеет в силу сингулярного разложения представление

$$\Pi(\tau) = U(\tau)\Sigma(\tau)V^T(\tau) \quad (10)$$

где $\Sigma(\tau)$ – $(\rho \times \nu)$ диагональная матрица, имеющая на главной диагонали сингулярные числа матрицы $\Pi(\tau)$, $U(\tau)$ – ортогональная $(\rho \times \rho)$ матрица, столбцы которой образуют ле-

вый сингулярный базис матрицы $\Pi(\tau)$, $V(\tau)$ – ортогональная $(\nu \times \nu)$ матрица, столбцы которой образуют правый сингулярный базис матрицы $\Pi(\tau)$. Если в (9) перейти к евклидовым векторным нормам, то становятся справедливыми оценочные неравенства

$$\alpha_m(\tau) \leq \|\kappa(\tau)\| / \|\chi(\tau)\| \leq \alpha_M(\tau), \forall \tau, \quad (11)$$

где $\alpha_m(\tau)$, $\alpha_M(\tau)$ – экстремальные элементы алгебраического спектра $\sigma_\alpha\{\Pi(\tau)\}$ сингулярных чисел матрицы $\Pi(\tau)$. Наибольшее и наименьшее сингулярные числа $\alpha_M(\tau)$, $\alpha_m(\tau)$ матрицы $\Pi(\tau)$ в (9) однозначно определяют на матрице правых сингулярных векторов $V(\tau)$, те из них, которые на сфере $\|\chi(\tau)\| = \text{fix}$ отображаются в наибольшую и наименьшую полуоси эллипсоида, получаемого с помощью (9), причем длины этих полуосей $\alpha_M(\tau)\|\chi(\tau)\|$ и $\alpha_m(\tau)\|\chi(\tau)\|$ соответственно.

Концепция 2. Пусть задача исследования многомерных систем управления сводится к векторно-матричному представлению вида (9)

$$\kappa(\tau) = \Pi(\tau)\chi(\tau=0), \quad \forall \tau \quad (12)$$

где вектор $\chi(\tau=0) = \chi(0)$, в отличие от (9), является стационарным по τ . Тогда могут быть записаны оценочные неравенства вида (11)

$$\alpha_m(\tau) \leq \|\kappa(\tau)\| / \|\chi(0)\| \leq \alpha_M(\tau), \forall \tau, \quad (13)$$

где $\alpha_m(\tau)$, $\alpha_M(\tau)$ – экстремальные элементы алгебраического спектра $\sigma_\alpha\{\Pi(\tau)\}$ сингулярных чисел матрицы $\Pi(\tau)$ (4), однозначно определяющие на матрице правых сингулярных векторов $V(\tau)$, те из них, которые на сфере $\|\chi(0)\| = \gamma = \text{const}$ отображаются в наибольшую и наименьшую полуоси эллипсоида с полуосями $\gamma\alpha_M(\tau)$ и $\gamma\alpha_m(\tau)$ соответственно.

Концепция 3. Пусть задача исследования многомерных систем управления сводится к векторно-матричному представлению вида (9). Тогда в евклидовых векторных нормах справедлива эквивалентная форма записи неравенства (11)

$$\alpha_m(\tau)\|\chi(\tau)\| \leq \|\kappa(\tau)\| \leq \alpha_M(\tau)\|\chi(\tau)\|, \forall \tau. \quad (14)$$

Концепция 4. Пусть задача исследования многомерных систем управления сводится к векторно-матричному представлению вида (12). Тогда в евклидовых векторных нормах справедлива эквивалентная форма записи неравенства (13)

$$\alpha_m(\tau)\|\chi(0)\| \leq \|\kappa(\tau)\| \leq \alpha_M(\tau)\|\chi(0)\|, \forall \tau. \quad (15)$$

Концепция 5. Если матрица $\Pi(\tau)$ в (9), (12) представима в одной из форм

$$\Pi(\tau) = \bar{\Pi}R(\tau), \quad \Pi(\tau) = N(\tau)\bar{\Pi}, \quad \Pi(\tau) = N(\tau)\bar{\Pi}R(\tau), \quad (16)$$

где $R(\tau)$, $N(\tau)$ – матрицы из класса ортогональных или унитарных, тогда становятся стационарными по τ оценочные неравенства (11) для задачи (9)

$$\bar{\alpha}_m \leq \|\kappa(\tau)\| / \|\chi(\tau)\| \leq \bar{\alpha}_M, \forall \tau \quad (17)$$

и оценочные неравенства (13) для задачи (12)

$$\bar{\alpha}_m \leq \|\kappa(\tau)\|/\|\chi(0)\| \leq \bar{\alpha}_M, \forall \tau \quad (18)$$

где $\bar{\alpha}_m, \bar{\alpha}_M$ являются экстремальными элементами алгебраического спектра $\sigma_\alpha\{\bar{\Pi}\}$ сингулярных чисел стационарной по τ матрицы $\bar{\Pi}$.

Концепция 6. Пусть задача исследования многомерных управляемых процессов, сведенная к (9), дополнена векторно-матричным соотношением

$$\zeta(\tau) = \Psi(\tau)\chi(\tau). \quad (19)$$

Пусть при этом в задаче исследования многомерных управляемых процессов представляет интерес изучение поведения отношения

$$\delta_{\kappa\zeta}(\tau) \stackrel{\Delta}{=} \|\kappa(\tau)\|/\|\zeta(\tau)\| \quad (20)$$

евклидовых векторных норм. Тогда в силу обобщенного отношения Релея, которое является скалярной формой обобщенной задачи собственных значений, оказываются справедливыми оценочные неравенства

$$\lambda_{\Pi\Psi_m}(\tau) \leq \delta_{\kappa\zeta}(\tau) = \|\kappa(\tau)\|/\|\zeta(\tau)\| \leq \lambda_{\Pi\Psi_M}(\tau) \quad (21)$$

где скалярные оценки $\lambda_{\Pi\Psi_m}(\tau)$ и $\lambda_{\Pi\Psi_M}(\tau)$ при условии, что $\Psi^T(\tau)\Psi(\tau) \forall \tau$ невырожденная матрица, вычисляются для $\forall \tau$ с помощью решения обобщенного характеристического уравнения

$$\det(\mu(\tau)\Psi^T(\tau)\Psi(\tau) - \Pi^T(\tau)\Pi(\tau)) = 0, \quad (22)$$

так что

$$\lambda_{\Pi\Psi}(\tau) = |\mu^{1/2}(\tau)|. \quad (23)$$

Если матрицы задачи $\Pi(\tau)$ и $\Psi(\tau)$ представимы в форме

$$\Pi(\tau) = Q\pi(\tau), \quad \Psi(\tau) = R\pi(\tau), \quad (24)$$

где $\pi(\tau)$ – произвольная квадратная матрица, то оценочные неравенства (21) становятся стационарными по τ и принимают вид

$$\lambda_{Q R m} \leq \delta_{\kappa\zeta}(\tau) = \|\kappa(\tau)\|/\|\zeta(\tau)\| \leq \lambda_{Q R M} \quad \forall \tau \quad (25)$$

где экстремальные оценки $\lambda_{Q R m}(\tau)$, $\lambda_{Q R M}(\tau)$ вычисляются при условии, что матрица $R^T R$ обратима, с помощью решения обобщенного характеристического уравнения, стационарного по τ

$$\det(\mu R^T R - Q^T Q) = 0.$$

Концепция 7. Пусть в задаче исследования многомерных управляемых процессов, сведенной к линейной алгебраической задаче вида (1), критериальная матрица является матричной функцией от вектора ρ так, что $\Pi(\tau) = \Pi(\rho, \tau)$. Очевидно, что если для *сепаратных* (частных) реализаций вектора ρ в $\Pi(\tau) = \Pi(\rho, \tau)$ перейти к евклидовым векторным нормам, то справедливы оценочные неравенства

$$\alpha_m(\tau, \rho) \|\chi(\tau)\| \leq \|\kappa(\tau, \rho)\| \leq \alpha_M(\tau, \rho) \|\chi(\tau)\|, \forall \tau \quad (26)$$

где $\alpha_m(\tau, \rho)$, $\alpha_M(\tau, \rho)$ – экстремальные элементы алгебраического спектра сингулярных чисел *сепаратной критериальной* матрицы (24). Если соотношение (26) дополнить условием принадлежности вектора ρ сфере $\|\rho\| = \text{const}$, то тогда выполняются оценочные неравенства

$$\tilde{\alpha}_m(\tau) \|\chi(\tau)\| \leq \alpha_m(\tau, \rho) \|\chi(\tau)\| \leq \|\kappa(\tau)\| \leq \alpha_M(\tau, \rho) \|\chi(\tau)\| \leq \tilde{\alpha}_M(\tau) \|\chi(\tau)\|, \forall \tau \quad (27)$$

где $\tilde{\alpha}_m(\tau)$, $\tilde{\alpha}_M(\tau)$ – экстремальные элементы алгебраического спектра сингулярных чисел *глобальной критериальной* матрицы $\Pi(\tau) = \Pi(\rho \in \|\rho\| = \text{const}, \tau)$

Концепция 8. Относительные вариации элементов задачи (12) связаны с числом обусловленности $C\{\Pi(\tau)\}$, $\forall \tau$ в силу неравенства

$$\delta_{\kappa}(\tau) \leq C\{\Pi(\tau)\} (\delta_{\chi(0)} + \delta_{\Pi(\tau)} + \delta_{\Pi(\tau)} \delta_{\chi(0)}) \quad (28)$$

где $\delta_{(*)}^{\Delta} = \frac{\|\Delta(*)\|}{\|(*)\|}$ – относительная вариация элемента $(*)$ задачи (12).

Эллипсоидные показатели качества многомерных систем управления конструируются с использованием этих базовых алгебраических концепций. Если задача управления сведена к линейной (локально-линейной) алгебраической задаче, то авторы следовали положениям следующего определения.

Определение 2. Экстремальные элементы алгебраического спектра сингулярных чисел вида (11), (13), (14), (15), (26) и (27) соответствующих критериальных матриц $\Pi(\tau)$ являются скалярными оценками векторного процесса $\kappa(\tau)$, порожденного вектором χ , принадлежащим некоторой сфере $\|\chi\| = \gamma = \text{const}$, содержательно представляют собой оценки качества многомерных процессов в форме *эллипсоидных мажорант и минорант*, а полученные на них стандартные показатели качества носят название *эллипсоидных показателей качества*.

Использование сингулярного разложения матрицы (10) линейной алгебраической задачи (9) позволяет ввести в рассмотрение тройки, составленные из экстремальных элементов алгебраического спектра сингулярных чисел и согласованных с ними элементов левого и правого сингулярных базисов. Эти тройки задают соответственно точные нижнюю и верхнюю границы, на которых скалярные неравенства (11), (13), (14), (15), (26) и (27) в нормах обращаются в равенства, что является методологической основой построения минорирующего и мажорирующего эллипсоидных показателей качества многомерных процессов, сводящихся к линейной алгебраической задаче.

К оценкам вида (11), (13) и (14) сводятся практически все оценки качества многомерных процессов при конечномерном и стохастическом воздействиях. В зависимости от конструирования матрицы $\Pi(\tau)$ в проблемной постановке можно получить различные показатели качества многомерных процессов.

Вычисление элементов сингулярного разложения матриц, а также вычисление обобщенных собственных значений осуществляется с помощью вычислительно устойчивых SVD, GSVD и QZ процедур, соответственно имеющихся в среде MATLAB.

Использование возможностей SVD-разложения критериальных матриц позволяет решить задачи построения эллипсоидных показателей как структурных свойств объектов управления, таких как управляемость по состоянию, управляемость по выходу и наблюдаемость, так и эллипсоидных показателей качества процессов в многомерных системах при внешнем конечномерном воздействии.

Заключение. Алгебраический метод Харитоновского направления исследований робастной устойчивости интервальных динамических систем, рассмотренный в данной работе, является дальнейшим развитием основных результатов работ [21, 22], который позволяет решать проблему робастной устойчивости при общем виде интервальной матрицы системы. При этом метод направлен для решения задач робастной устойчивости как для линейных непрерывных, так и для линейных дискретных интервальных динамических систем.

Следует отметить, что **Замечание** к теореме 1 существенным образом уточняет результаты работы [21], а именно подчеркивает необходимость полного набора из четырех угловых полиномов Харитонова (с учетом кратности полиномов) для определения робастной устойчивости интервальных динамических систем. Также условия необходимости и достаточности по теореме 1 соответствуют угловым сепаратным коэффициентам, определяемым последовательно от 1-го до n -го коэффициента характеристического полинома системы, которые могут быть найдены с использованием методов нелинейного программирования.

Аппарат модальных, или в современной терминологии эллипсоидных оценок, представленный в данной работе базовыми концепциями, позволяет получить оценки качества процессов в многомерных системах, аналогичных одномерным системам, через скалярные мажоранты и миноранты сингулярных чисел, соответствующих критериальным матрицам систем как в непрерывном, так и в дискретном случаях. Вычислительные процедуры эллипсоидных оценок строятся на базе SVD-разложения матриц, широко практикуемых при исследовании алгебраических задач.

Литература

1. Аносов Д.В. Грубые системы // Топология, обыкновенные дифференциальные уравнения, динамические системы: Сб. обзорных статей. 2. К 50-летию института (Труды МИАН СССР. Т.169). – М.: Наука, 1985. – С. 59–93.
2. Dorato P.A. Historical review of robust control//IEEE Contr. Syst. Magazine. –1987. – V.7. – No 2. – Pp. 44–47.
3. Джури Э.И. Робастность дискретных систем // Автоматика и телемеханика, 1990. – №5. С.4-28.
4. Оморев Р.О. Максимальная грубость динамических систем // Автоматика и телемеханика. –1991. – №8. – С. 36–45.

5. Оморев Р.О., Ушаков А.В. Оценки робастности в задачах управления и наблюдения // Изв. вузов. Электромеханика. –1991. – № 1. – С. 78– 85.
6. Гусев Ю.М., Ефанов В.Н., Крымский В.Г. и др. Анализ и синтез линейных интервальных динамических систем (состояние проблемы). I. Анализ с использованием интервальных характеристических полиномов // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. – 1991. – №1. – С. 3– 23.
7. Поляк Б.Т., Цыпкин Я.З. Робастная устойчивость линейных систем// Итоги науки и техники. Сер. Техническая кибернетика. – Т.32. – М.: ВИНТИ, 1991. – С. 3–31.
8. Дискуссия по проблеме робастности в системах управления // Автоматика и телемеханика.–1992. – №1. – С. 165–176.
9. Оморев Р.О. Модальная чувствительность, робастность и грубость динамических систем (обзорная статья) // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. –2021. –Т. 21. –№ 2. – С. 179–190.
10. Харитонов В.Л. Об асимптотической устойчивости положения равновесия семейства систем линейных дифференциальных уравнений // Дифференц. уравнения. – 1978. –Т.14. – № 11. – С. 2086–2088.
11. Никифоров В.О. Робастное управление линейным объектом по выходу // Автоматика и телемеханика. –1998. – №9. – С. 87–99.
12. Пелевин А.Е. Синтез робастного закона управления при неопределенностях параметров модели объекта // Гироскопия и навигация. – 1999. – № 2(25). – С. 63–74.
13. Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации. – Киев: Наук. Думка, 2006. – 264 с.
14. Неймарк Ю.И. Робастная устойчивость и D-разбиение // Автоматика и телемеханика. – 1992. – №7. – С. 10–18.
15. Поляк Б.Т., Цыпкин Я.З. Частотные критерии робастной устойчивости и апериодичности линейных систем // Автоматика и телемеханика. 1990. –№ 9. – С. 45–54.
16. Поляк Б.Т., Цыпкин Я.З. Робастный критерий Найквиста // Автоматика и телемеханика. 1992. – № 7. – С. 25–31.
17. Акунов Т.А., Алишеров С., Оморев Р.О., Ушаков А.В. Модальные оценки качества процессов в линейных многомерных системах. – Бишкек: Илим, 1991. – 59 с.
18. Акунов Т.А., Сударчиков С.А., Ушаков А.В. Эллипсоидные оценки качества систем с интервальными параметрами, конструируемые на харитоновской выборке из массива угловых реализаций // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2004. – № 14. – С. 54–61.
19. Оморев Р.О. Алгебраический метод исследования робастности интервальных динамических систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2020. – Т. 20. – № 3. – С. 364–370.
20. Оморев Р.О. Количественные меры грубости динамических систем и их приложения к системам управления... Диссертация на соискание ученой степени доктора

- технических наук. – СПб.: Санкт-Петербургский институт точной механики и оптики, 1992. – 188 с.
21. Оморев Р.О. Робастность интервальных динамических систем. I. Робастность непрерывных линейных интервальных динамических систем // Теория и системы управления. 1995. – №1. – С.22–27.
 22. Оморев Р.О. Робастность интервальных динамических систем. II. Робастность дискретных линейных интервальных динамических систем // Теория и системы управления. – 1995. – №3. – С.3–7.
 23. Bialas S. A necessary and sufficient condition for stability of internal matrices // Int. J. Control 1983. – V.37. – No 4. – P. 717–722.
 24. Barmish B.R., Fu M., Saleh S. // Stability of a polytope of matrices: Counterexamples // IEEE Trans. Automatic. Control. 1988. V.AC-33. – No 6. – P. 569–572.
 25. Kraus F.J., Anderson B.D.O., Jury E.I., Mansour M. On the robustness of low order Shur polynomials // IEEE Trans. Circ. Systems. 1988. – V. CAS-35. – No 5. – P. 909–913.
 26. Mansour M., Kraus F.J. On robust stability of Shur polynomials // Report N 87-05, Inst. Autom. Cont. Ind. Electronics, Swiss, Fed. Inst. Tech. (ETH). Zurich, 1987. – 34 p.
 27. Оморев Р.О. О дискретном аналоге теоремы Харитонова // Наука и новые технологии. 2002. – №3. – С. 5–10.
 28. Цыпкин Я.З. Теория импульсных систем. – М.: Физматгиз. 1958. – 724 с.
 29. Maryak J.L., Hunter L.W. Favin S. Automated System Monitoring and Diagnosis via SVD. Automatica. Journal of IFAC, V.33. – N11, 1977. – Pp.2059–2063.
 30. Ringwood J. Multivariable control using the singular value decomposition in steel rolling with quantitative robustness assessment. Control Engineering Pracrice. V. 3(4) 1995. Pp.495-503.
 31. Hovd M., Braatz R.D., Skogestad S. Optimal and robust control of SVD processes. Technical report, University of Trondheim, Trondheim, Norway, 1996.
 32. G.Ray, A.N. Prasad, G.D. Design of a robust load-frequency controller for interconnected power systems based on the singular-value decomposition method. Electric Power Systems Research. V.37 (3) 1996. – Pp.209–219.
 33. Liu K. Application of SVD in optimization of structural modal test. Computers&Structures V. 63(1). –1997. – Pp. 51–59.
 34. Zhu Z., Jutan A. Robust multivariable control using an SVD-based controller. Chemical Engineering Science. V. 53 (6). – 1998. – Pp.1145–1151.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 631.6. (575.2)

*Пресняков К.А., д.т.н., с.н.с.,**Керимкулова Г.К. к.ф.-м.н., с.н.с., gulsaat@mail.ru**Аскалиева Г.А., к.т.н., 87guzya@mail.ru**Институт машиноведения и автоматики НАН КР***СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПУЛЬСАЦИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ И КОМПОНЕНТ СКОРОСТИ В ОТКРЫТОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВОДЫ**

Установлено распределение динамического давления по глубине потока воды: уменьшение динамического давления с уменьшением вертикальной координаты с максимальным относительным значением динамического давления в приповерхностном слое воды. Выявлено распределение пульсаций динамического давления по глубине потока воды: увеличение пульсаций динамического давления с уменьшением вертикальной координаты. Предварительная оценка величины сил, обусловленных динамическим давлением, составляет 270 Г силы на 1 см², а его пульсаций – 1 Г силы на 1 см².

Ключевые слова: динамическое давление, пульсации динамического давления

Введение. В открытом турбулентном потоке воды существует поле осредненных скоростей и связанных с ним поле пульсаций компонент скорости [1]. В связи с наличием в потоке воды инерционных сил в нем развивается поле гидродинамического давления и обусловленное им поле его пульсаций [2].

Постановка задачи исследования. В работе [3] выявлено распределение относительных пульсаций гидродинамического давления по глубине потока. Однако полученная там формула не является строгой, так как при отсутствии стандарта пульсаций гидродинамического давления упомянутое распределение установлено с применением в качестве делителя нормального давления, т.е. величины, характеризующей статическое давление. Возникает необходимость в поиске такой формы указанного распределения, которое не основано на использовании величины нормального давления.

Задачи исследований. Разработать схему расчета поля пульсаций гидродинамического давления, основанного на применении характерной величины, близкой по смыслу к динамическому давлению, и провести сравнительный анализ пульсаций гидродинамического давления и компонент скорости в открытом турбулентном потоке воды.

Решение поставленных задач. Вначале найдем распределение динамического давления по глубине потока воды, рассматривая прямолинейный поток воды (поперечные скорости достаточно малые) и учитывая, что при отсутствии универсального распределения вертикальной компоненты скорости воды по глубине потока ее полагаем одного порядка с распределением ее пульсаций, получим следующее выражение для динамического давления:

$$P_d = \rho \cdot (u^2 + v^2) = \rho \cdot u_*^2 \cdot \left(\left(\frac{u_m}{u_*} \right)^2 \cdot \tilde{y}^{2/m} + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right). \quad (1)$$

Перейдем к относительным значениям динамического давления, разделив его на величину нормального давления (здесь мы идем по следу предыдущего вывода [3] формулы для пульсаций динамического давления):

$$\begin{aligned}\tilde{P}_d = \frac{P_d}{P_0} &= \frac{\rho \cdot u_*^2 \cdot \left(\left(\frac{u_m}{u_*} \right)^2 \cdot \tilde{y}^{2/m} + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right)}{P_0} = \\ &= \frac{\rho \cdot u_*^2}{P_0} \cdot \left(\frac{u_m}{u_*} \right)^2 \cdot \tilde{y}^{2/m} + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}).\end{aligned}\quad (2)$$

Распределение динамического давления по глубине потока изображено на рисунке 1.

Анализ представленного графического материала позволяет заключить:

- динамическое давление для исследованных объектов монотонно уменьшается с уменьшением вертикальной координаты;
- максимальные относительные значения динамического давления соответствуют приповерхностному слою воды и составляют величины порядка первого и второго знака после запятой;
- минимальные относительные значения динамического давления наблюдаются в придонной части потока воды (на выступе шероховатости) и составляют величины от третьего знака до первого знака после запятой.

Теперь, следуя предыдущей логике анализа, найдем относительные значения пульсаций динамического давления (вторая схема расчета), которая основана на применении в качестве делителя не значения нормального давления (статической составляющей полного давления), а распределение динамического давления по глубине потока воды (рисунок 2)

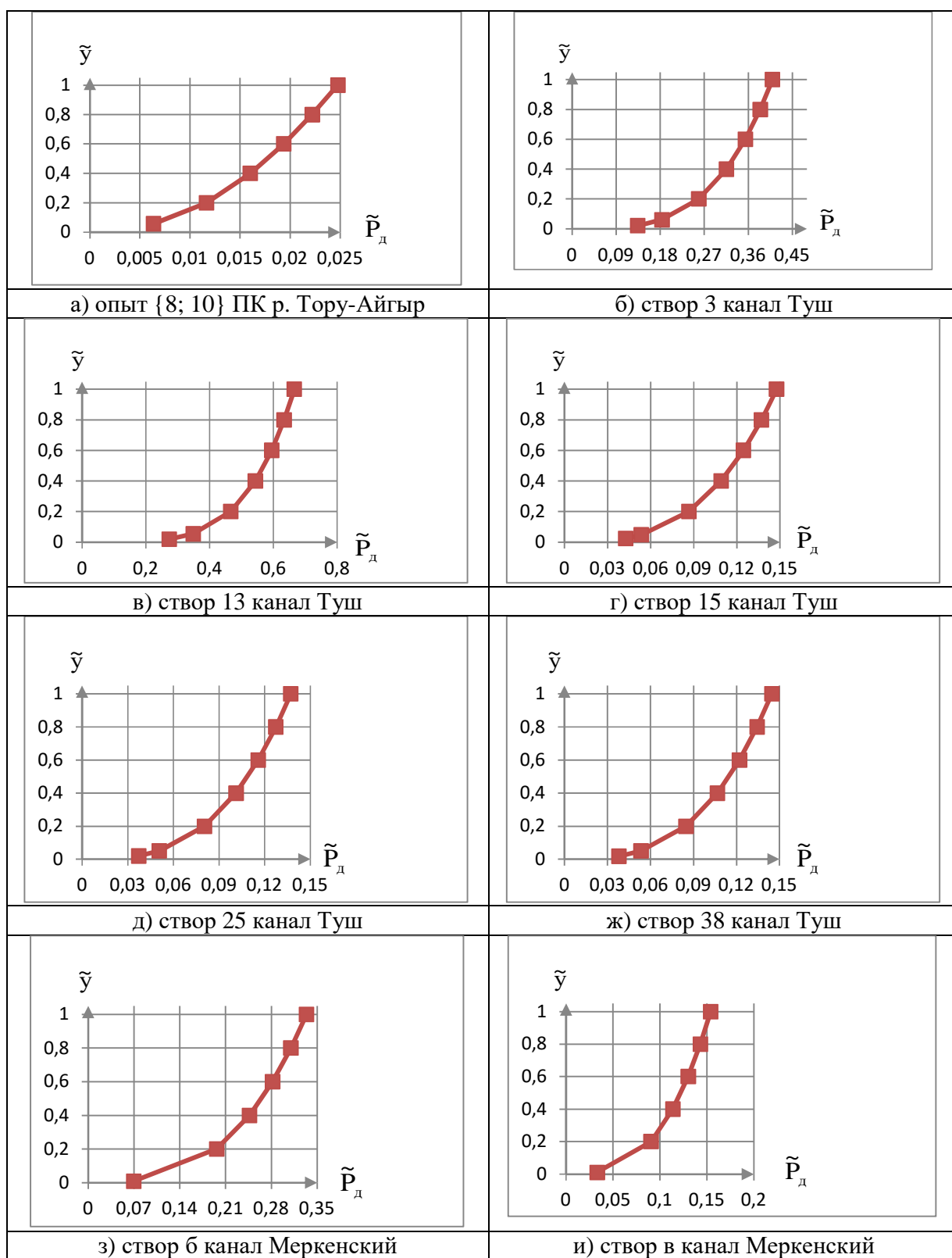


Рисунок 1– Распределение относительных значений динамического давления по глубине открытого турбулентного потока воды

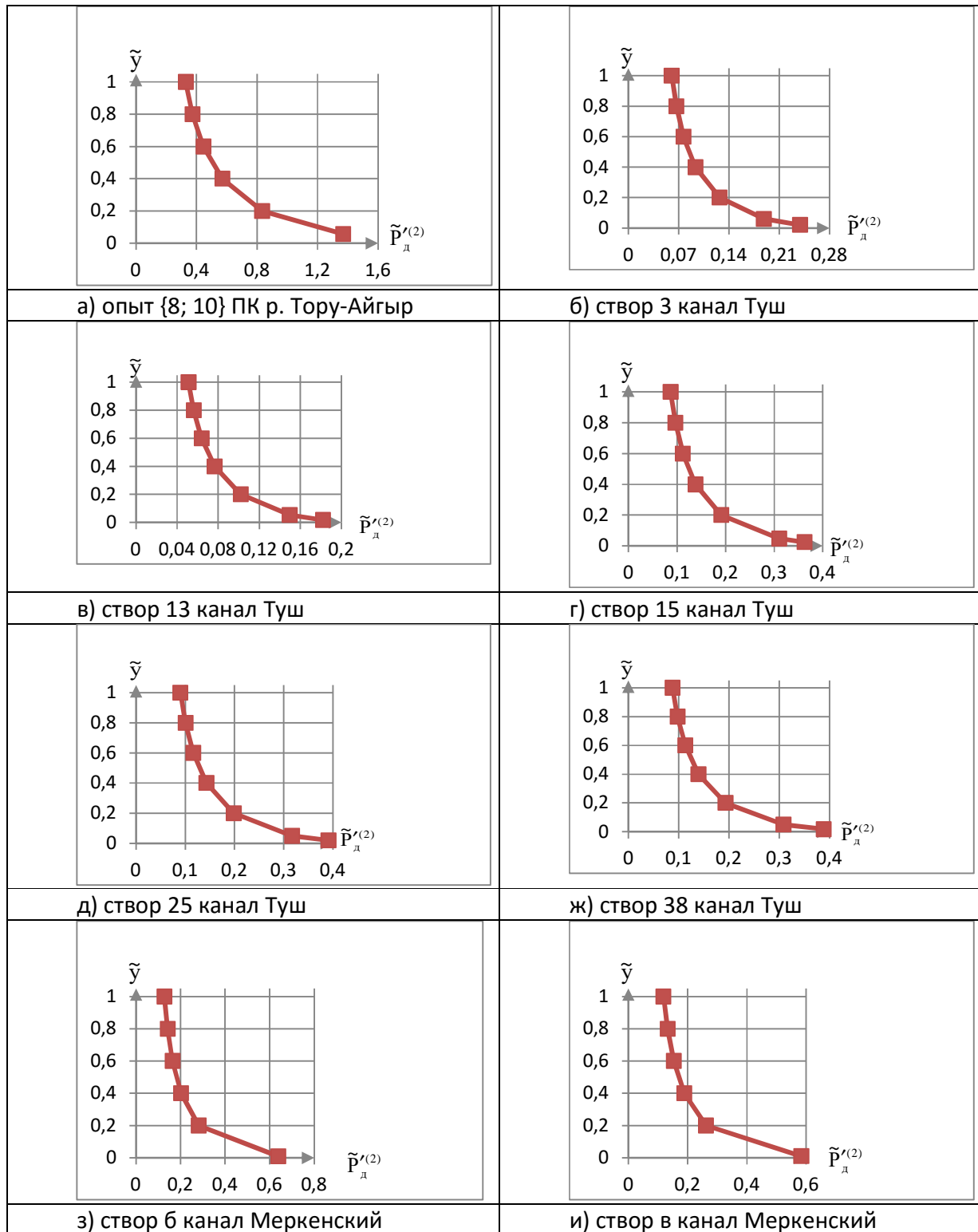


Рисунок 2 – Распределение относительных значений пульсаций динамического давления по глубине открытого турбулентного потока воды (вторая схема расчета).

$$\begin{aligned} \tilde{P}'_{\text{д}}(2) &= \tilde{P}'_{\text{д}} / P_{\text{д}} = \frac{P'_{\text{д}} / P_0}{P_{\text{д}} / P_0} = \frac{P'_{\text{д}}}{P_{\text{д}}} = \\ &= \frac{2 \cdot \rho \cdot u_*^2 \cdot \left(2,10 \cdot \frac{u_{\text{м}}}{u_*} \cdot \tilde{y}^{1/m} \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right)}{\rho \cdot u_*^2 \cdot \left(\left(\frac{u_{\text{м}}}{u_*} \right)^2 \cdot \tilde{y}^{2/m} + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right)} = \frac{2 \cdot \left(2,10 \cdot \frac{u_{\text{м}}}{u_*} \cdot \tilde{y}^{1/m} \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right)}{\left(\frac{u_{\text{м}}}{u_*} \right)^2 \cdot \tilde{y}^{2/m} + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y})}, \quad (3) \end{aligned}$$

где ρ – плотность воды, кг/м³; u_* – динамическая скорость потока воды, м/с; $u_{\text{м}}$ – максимальная скорость потока воды, м/с; $P_0 = 101\,345$ Па = $1,01 \cdot 10^5$ Па – нормальное давление, \tilde{y} – относительная вертикальная координата; m – показатель, зависящий от коэффициента Шези; $\phi(\tilde{y})$ и $\psi(\tilde{y})$ – координатные части пульсаций продольной и вертикальной компоненты скорости воды, приведенные в относительном виде.

Выявлен тип зависимости относительных значений пульсаций динамического давления от вертикальной координаты, а именно увеличение их значений с приближением ко дну потока воды. При этом для потоков бурным режимом течения воды максимальные значения пульсаций динамического давления составляют от 0,18 (канал Туш, створ 13, рис.2–в) до 0,64 (канал Меркенский, створ б, рис.2–з), а минимальные – от 0,05 (канал Туш, створ 13, рис.2–в) до 0,13 (канал Меркенский, створ б, рис.2–з).

Вторая схема расчета обладает следующими преимуществами:

- во-первых, мы избавились от неудачного делителя (нормальное давление – статическая составляющая полного давления), перейдя к более логичному делителю (распределение динамического давления по глубине потока воды);
- во-вторых, что является наиболее важным, характер распределения относительных пульсаций динамического давления по глубине потока совпадает с характером распределения пульсаций компонент скорости воды [4], что неудивительно, так как динамическое давление и его пульсации являются следствием существования в потоке воды инерционных сил.

Сравнительный анализ и обсуждение результатов исследований. В рамках этого анализа составим отношения относительных пульсаций динамического давления к относительным пульсациям продольной компоненты скорости воды (формула 4) и аналогичные отношения, где в качестве делителя использованы относительные пульсации вертикальной компоненты скорости воды (формула 5).

Подобные соотношения записываются в виде

$$\tilde{P}'_{\text{д}}(2) / \tilde{u}' = \frac{2 \cdot \left(2,10 \cdot \frac{u_{\text{м}}}{u_*} \cdot \tilde{y}^{1/m} \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right)}{\left(\frac{u_{\text{м}}}{u_*} \right)^2 \cdot \tilde{y}^{2/m} + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y})} : \phi(\tilde{y}), \quad (4)$$

$$\tilde{P}'_{д(2)} / \tilde{v}' = \frac{2 \cdot \left(2,10 \cdot \frac{u_m}{u_*} \cdot \tilde{y}^{1/m} \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right)}{\left(\frac{u_m}{u_*} \right)^2 \cdot \tilde{y}^{2/m} + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y})} : \psi(\tilde{y}). \quad (5)$$

Результаты расчетов по формулам (4), (5) приведены на рис. 3 и рис.4. соответственно.

Установлено, что характер кривых $\tilde{P}'_{д(2)} / \tilde{u}'$ и $\tilde{P}'_{д(2)} / \tilde{v}'$ одинаков и заключается в увеличении искомых отношений с понижением значений вертикальной координаты.

Максимальные значения указанных отношений заключены в пределах от 0,19 (канал Туш, створ 13, рис.3–в) до 0,65 (канал Меркенский, створ б, рис.3–з) для отношения $\tilde{P}'_{д(2)} / \tilde{u}'$, и от 0,41 (канал Туш, створ 13, рис.4–в) до 2,38 (канал Меркенский, створ б, рис.4–з) для отношения $\tilde{P}'_{д(2)} / \tilde{v}'$; минимальные значения искомых отношений составляют величины от 0,12 (канал Туш, створ 13, рис.3–в) до 0,31 (канал Меркенский, створ б, рис.3–з) для отношения $\tilde{P}'_{д(2)} / \tilde{u}'$, и от 0,08 (канал Туш, створ 13, рис.4–в) до 0,20 (канал Меркенский, створ б, рис.4–з) для отношения $\tilde{P}'_{д(2)} / \tilde{v}'$.

Отсюда можно сделать по крайней мере два важных вывода:

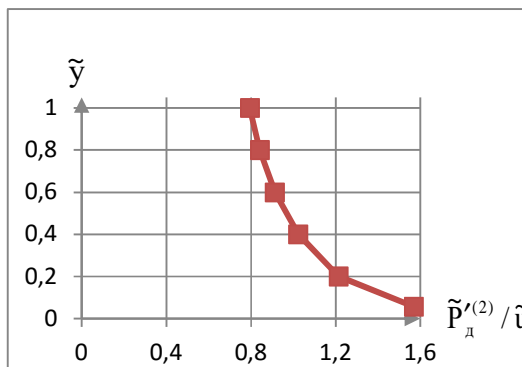
уровень влияния пульсаций динамического давления на перенос количества движения выше при рассмотрении вертикальных перемещений масс воды (действительно $\tilde{P}'_{д(2)} / \tilde{v}'$ больше $\tilde{P}'_{д(2)} / \tilde{u}'$);

участие пульсаций динамического давления в рассматриваемом процессе составляет $\approx 0,4$ до 2 от вклада пульсаций вертикальной компоненты скорости воды.

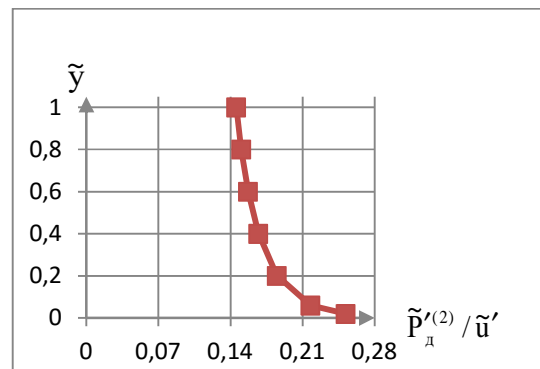
Оценим силу, вызываемую динамическим давлением (оценку произведем на основе материалов бурного течения турбулентного потока воды, при этом используем наибольшие значения динамического давления, наблюдаемые на выступе шероховатости)

$$F_{P_d} = P_d \cdot S = \tilde{P}'_d \cdot P_0 \cdot S \approx 0,27 \cdot 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 1\text{ м}^2 \approx 2,7 \cdot 1,01 \cdot 10^4 \text{ Па на } 1 \text{ м}^2 \quad (6)$$

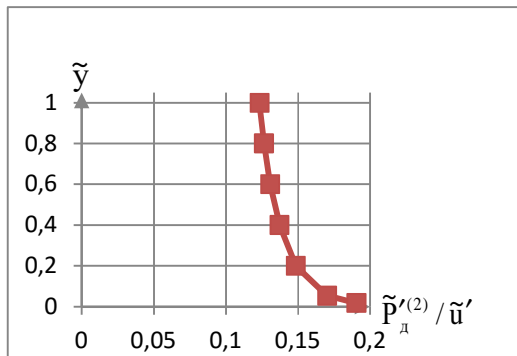
или $2,7 \cdot 1,01 \cdot 10^3$ кГ силы на 1 м^2 или 270 Г силы на см^2



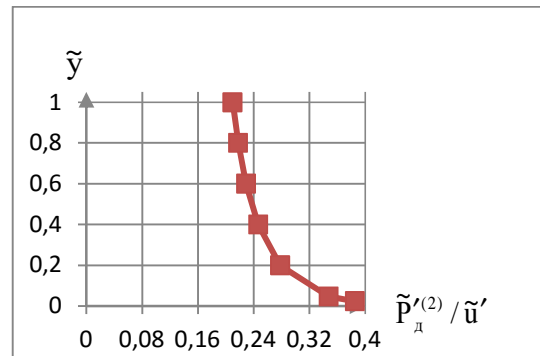
а) опыт {8; 10} ПК р. Торуг-Айгыр



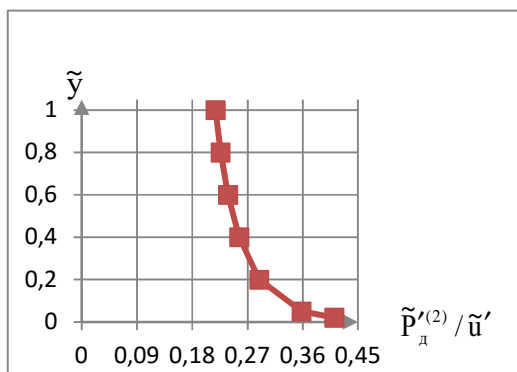
б) створ 3 канал Туш



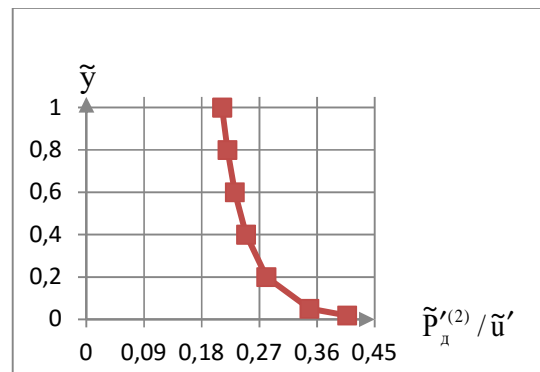
в) створ 13 канал Туш



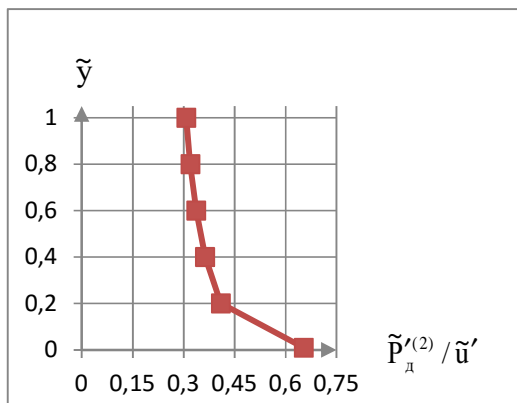
г) створ 15 канал Туш



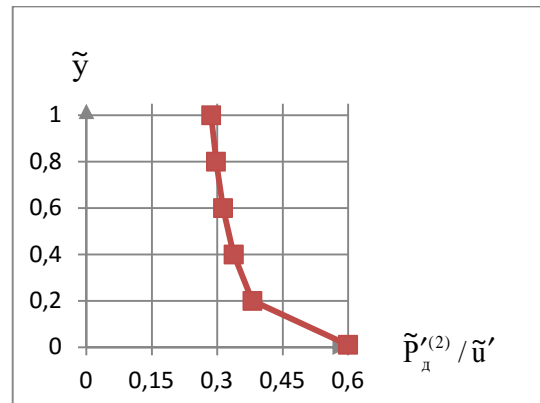
д) створ 25 канал Туш



ж) створ 38 канал Туш

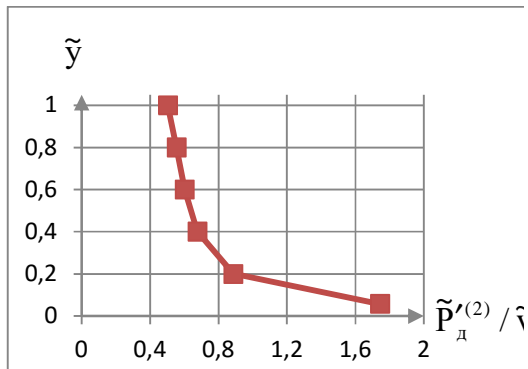


з) створ 6 канал Меркенский

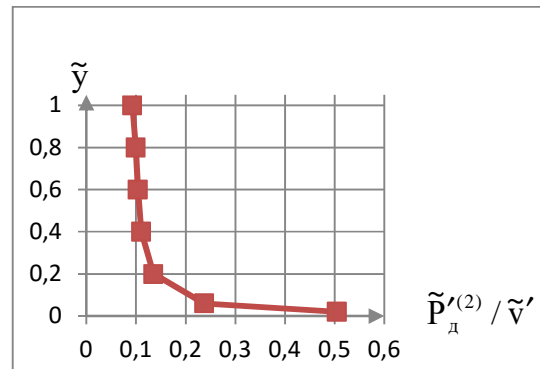


и) створ в канал Меркенский

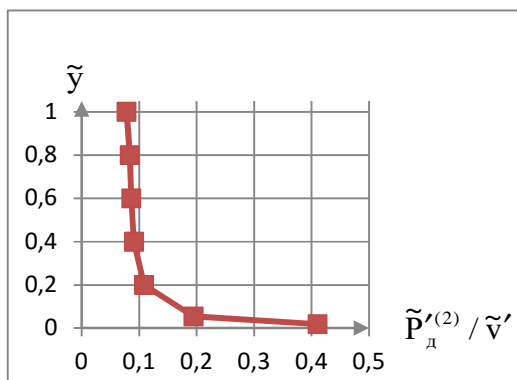
Рисунок 3 – Отношение относительных значений пульсаций динамического давления к относительным значениям пульсаций продольной компоненты скорости в открытом турбулентном потоке воды



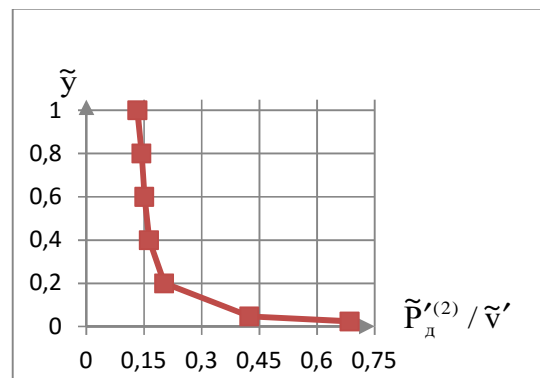
а) опыт {8; 10} ПК р. Тору-Айгыр



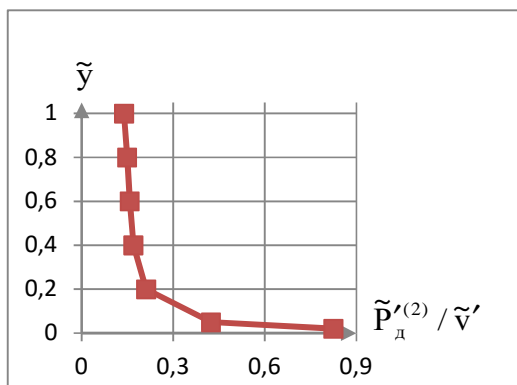
б) створ 3 канал Түш



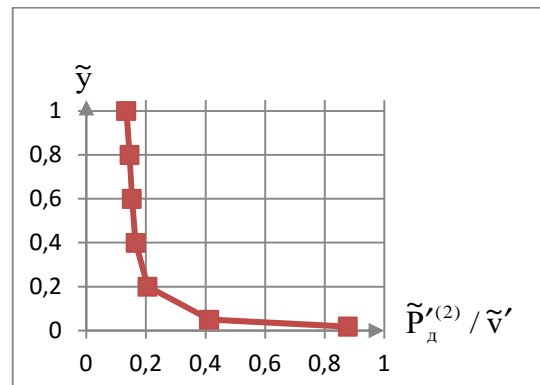
в) створ 13 канал Түш



г) створ 15 канал Түш



д) створ 25 канал Түш



ж) створ 38 канал Түш

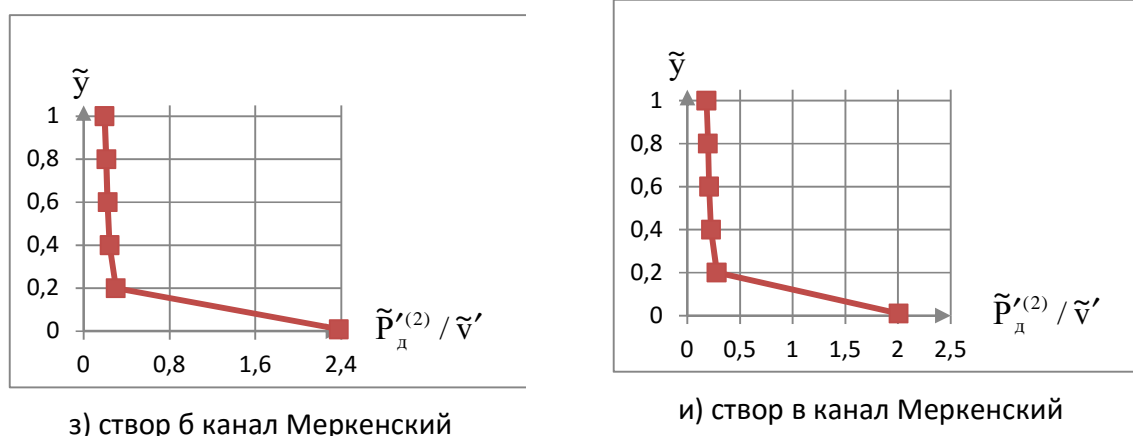


Рисунок 4– Отношение относительных значений пульсаций динамического давления к относительным значениям пульсаций вертикальной компоненты скорости в открытом турбулентном потоке воды

С учетом $F_{p_d} = 1 \text{ Г}$ силы на 1 см^2 [3]. Заметно, что силовое воздействие, развиваемое динамическим давлением ($F_{p_d} = 270 \text{ Г} / \text{см}^2$), на два порядка выше силы, вызываемой пульсациями динамического давления.

Заключение. Установлено распределение динамического давления по глубине потока воды (все это для объектов с бурным режимом течения воды): уменьшение динамического давления с уменьшением вертикальной координаты, максимальные относительные значения в приповерхностном слое воды составляют величины порядка первого и второго знака после запятой, а минимальные относительные значения составляют величины от третьего знака до первого знака после запятой. Выявлено распределение пульсаций динамического давления по глубине потока воды: увеличение пульсаций динамического давления с уменьшением вертикальной координаты. Предварительная оценка величины сил, обусловленных динамическим давлением, составляет 270 Г силы на 1 см^2 , а его пульсаций – 1 Г силы на 1 см^2 (оценка произведена по наибольшим значениям относительного динамического давления и по значениям относительных пульсаций динамического давления на выступе шероховатости).

Литература

1. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – Л.: Энергия (Лен.отделение), 1976.
2. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. Т.1 Структура потока. – М.: Госиздат техн.-теор. лит., 1954. – 323 с.
3. Пресняков К.А., Керимкулова Г.К., Аскалиева Г.О. Пульсации динамического давления в открытом турбулентном потоке воды // Проблемы автоматики и управления. –2021. –№2(41).
4. Никитин И.К. Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области.– Киев: Изд-во АН УССР, 1963.–138с.

УДК 519.633.550.34

Курманалиева Г.С., Сатыбаев А.Дж. gulzat-kurmanalieva@mail.ru, abdu-satybaev@mail.ru

Ошский технологический университет, Кыргызстан

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОГО АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОДНОМЕРНОЙ ОБОБЩЕННОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ДЕЙСТВИЙ ПО НЕРВНОМУ ВОЛОКНУ

В данной статье исследована обобщенная обратная задача процесса распространения импульса по аксону, которая является задачей параболического типа. Эта задача с помощью преобразования Лапласа сведена к обобщенной обратной задаче гиперболического типа, и к этой задаче применены методы выделения особенностей и характеристик. В этом случае получаем регулярную обратную задачу с данными на характеристиках, и к данной задаче применен метод конечно-разностный, и получено приближенное решение обратной задачи. Из этого решения вычислено разностное решение обратной задачи параболического типа, которое сходится к точному решению.

Ключевые слова: одномерная обобщенная; обратная задача; параметры; потенциал действий; распространение; нервное волокно; численный алгоритм; параболическая; преобразование Лапласа; гиперболическая задача; метод характеристики; выделения особенностей; конечно-разностный; сходимость решения.

Введение. Потенциалом покоя называют разность электрических потенциалов мембраны внутренней и наружной части клетки.

Потенциалом действия называют возбуждение клетки или быстрое колебание мембранного потенциала вследствие диффузии ионов в клетку и из клетки. Нервный импульс (потенциал действия) мембраны имеет следующие фазы: фазы реполяризации, фазы деполяризации, а также фазы гиперполяризации, а пиком, или спайком, называют высокоамплитудную быстропротекающую часть (они наглядно даны в следующем рисунке).

В работе Богатова Н.М. и др. [1] проведен анализ изменения формы потенциала действий при его распространении в нервном волокне и показано, что генерация заряда в нервном волокне обуславливает эффективность длины и уменьшение фазовой скорости распространения сигнала. Установили, что высокая эффективность распространения сигнала в миелиновых нервных волокнах достигается в результате сальтаторного механизма распространения.

Решение задачи распространения потенциала действий по нервному волокну для возбуждающего импульса произвольной формы дана в коллективной монографии под руководством профессора Богатова Н.М. [2].

В работе Селезова И.Т., Морозова Л.В. [3] получено точное аналитическое решение обобщенной задачи о распространении нервного волокна в рамках Ходжкина-Хаксли на основе интегрального преобразования Лапласа и теоремы Эфроса в случае, когда начальный импульс отклоняется от ступенчатой функции Хевисайда.

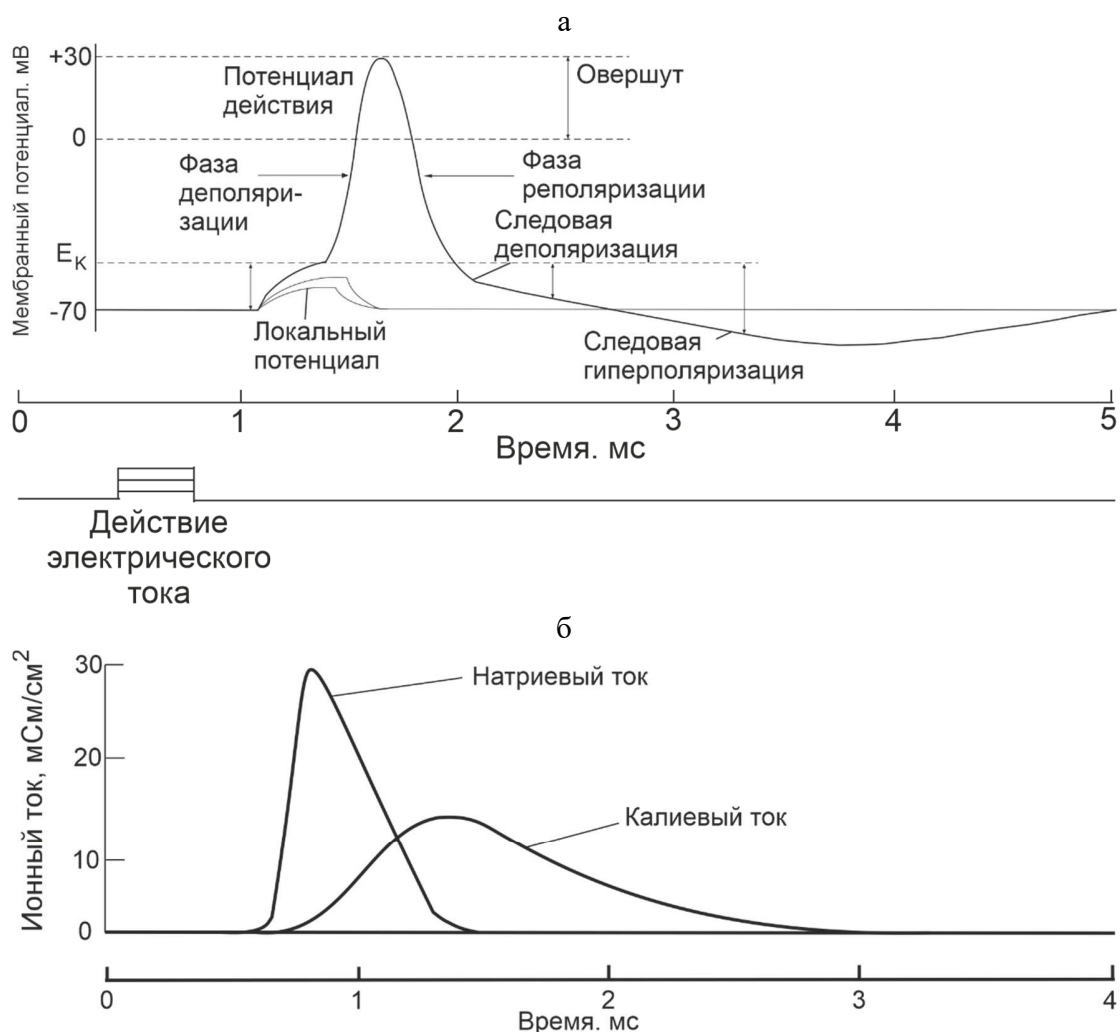


Рисунок 1 – Потенциал действия, его фазы и ионные токи (а, б).

Проведен сравнительный анализ расчетов с результатами, полученными ранее для случая возбуждающей функции Хевисайда, и анализировано влияние отклонения при приближении к решению, соответствующему функции Хевисайда.

При пространственно-однородном возбуждении волокна поведение мембранного потенциала описывается уравнением:

$$C \frac{d\varphi}{dt} = -I,$$

где C – емкость мембраны, I – ионный ток, который определяется формулой:

$$I = g_{Na}(\varphi - \varphi_{Na}) + g_k(g - g_k) + g_e(\varphi - \varphi_e),$$

где $g_{NA} = \bar{g}_{NA} \cdot m^3 h$, $g_K = \bar{g}_K n^4$, $\frac{dm}{dt} = \alpha_m(1-m) - \beta_m \cdot m$, $\frac{dh}{dt} = \alpha_h(1-h) - \beta_h \cdot h$, $\frac{dn}{dt} = \alpha_n(1-n) - \beta_n \cdot n$, g_e – постоянная, $\varphi_k = (kT/e) \ln(C_k^0 / C_k^i)$ – калиевый мембранный потенциал, T – абсолютная температура, e – заряд электрона, k – коэффициент, C_0^k, C_k^i – внешняя и внутренняя калиевая концентрация;
 $\varphi_{NA} = (kT/e) \ln(C_{NA}^0 / C_{NA}^i)$, C_{NA}^0, C_{NA}^i – внешняя и внутренняя натриевая концентрация; m, h, n – параметры.

Распределение мембранного потенциала $j(x, t)$ в немиелинизированном волокне описывается следующим уравнением:

$$C \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{R} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - I, \quad (1)$$

где C – емкость мембраны, проходящая на единицу длины волокна, R – сумма продольных сопротивлений на единицу длины волокна, I – ионный ток, протекающий через мембрану волокна единичной длины, и является функционалом от потенциала $j(x, t)$, т.е. зависит от времени t , координата x .

При одновременном прохождении нервного импульса по двум волокнам описывается системой двух уравнений:

$$C_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = \frac{R_2 + R_3}{\gamma} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} - \frac{R_3}{\gamma} \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial x^2} - I_1, \quad (2)$$

$$C_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -\frac{R_3}{\gamma} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} - \frac{R_1 + R_3}{\gamma} \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial x^2} - I_2, \quad (3)$$

где R_1, R_2 – продольные сопротивления первого и второго волокон, R_3 – продольное сопротивление внешней среды, $\gamma = R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3$, I_1, I_2 – ионные токи.

Постановка одномерной обобщенной обратной параболической задачи.

Математическая модель процесса распространения импульса по аксону (по нервному волокну) параболическим уравнением [4, 5] (см. также формулы (1)-(3)):

$$C_m(x) u_t'(x, t) = \frac{r_a(x)}{2\rho_a(x)} u_{xx}'(x, t) - \frac{u(x, t)}{\rho_m(x)l}, \quad (x, t) \in R_+^2, \quad (4)$$

где $C_m(x)$ – емкость на единицу площади мембраны, $r_a(x)$ – радиус нервного волокна, $\rho_m(x), \rho_a(x)$ – удельное сопротивление плазмы и нервного волокна, l – толщина мембраны, $u(x, t)$ – внутриклеточный потенциал действия, индексы a и m – означают индексы аксоны (нервного волокна) и мембраны соответственно.

Для решения прямой задачи уравнения (4) задаем начальное и граничное условие следующего вида:

$$u(x, t)|_{t=0} \equiv 0, \quad u_x'(x, t)|_{x=0} = h_0 \theta(t) + r_0 \theta_1(t) + \rho_0 \theta_2(t), \quad t \in R_+, \quad (5)$$

где h_0, r_0, ρ_0 – заданные положительные числа, $\theta(t)$ – тета-функция Хевисайда, $\theta_1(t) = t\theta(t)$, $\theta_2(t) = \frac{t^2}{2}\theta(t)$.

Начальное условие (5) означает, что нервное волокно до некоторого времени $t = 0$ находится в положении покоя, и начиная с времени $t = 0$ задается определенное напряжение, и процесс распространения импульса начинается по нервному волокну.

Граничное условие (5) означает, что начиная с времени $t = 0$ задается источник напряжения с силами h_0, r_0, ρ_0 .

Для определения неизвестных коэффициентов $C_m(x)$ или $r_a(x)$ или $\rho_a(x)$ задаем дополнительную информацию в виде:

$$u(x, t)|_{x=0} = g(t), t \in [0, T] \quad (6)$$

где T – положительное постоянное время.

Одномерная обобщенная обратная задача параболического типа (4) – (6) заключается в определении функций: $C_m(x)$ или $r_a(x)$ или $\rho_a(x)$, а также функцию $u(x, t)$.

Постановка одномерной обобщенной обратной гиперболической задачи

Используя методики С.И. Кабанихина [6] (преобразование Лапласа), из задачи (4) – (5) получим задачу уравнения гиперболического типа:

$$C_m(x) \frac{\partial^2 V(x, t)}{\partial t^2} = \frac{r_a(x)}{2\rho_a(x)} V_{xx}(x, t) - \frac{V(x, t)}{\rho_m(x)l}, (x, t) \in R_+^2, \quad (7)$$

$$V(x, t)|_{t < 0} \equiv 0, \quad \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_0 \delta(t) + r_0 \theta(t) + p_0 \theta_1(t), t \in R_+, \quad (8)$$

где $\delta(t)$ – дельта-функция Дирака, h_0, r_0, p_0 – заданные положительные числа. Решение этих задач $u(x, t)$ и $V(x, t)$ связано следующим интегралом

$$u(x, t) = \int_0^\infty V_t(x, \tau) G_t(t, \tau) d\tau = \int_0^\infty V(x, \tau) G_{tt}(t, \tau) d\tau, \quad (9)$$

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

Здесь для определения неизвестных параметров дополнительная информация будет

$$V(x, t)|_{x=0} = f(t), t \in [0, T], \quad (10)$$

где $f(t) = \int_0^\infty g(\tau) G_{tt}(t, \tau) d\tau$, $G(t, \tau)$ – функция Грина.

Одномерная обобщенная обратная гиперболическая задача заключается в определении функции $V(x, t)$, а также неизвестных коэффициентов $C_m(x)$ или $r_a(x)$ или $\rho_a(x)$ из задачи (7), (8), (10).

Пусть относительно параметров уравнения выполнено следующее условие

$$C_m(x), r_a(x), \rho_a(x) \in \Lambda_0, \quad (11)$$

где $\Lambda_0 = \{C_m(x) \in C^6(R_+), (C_m)'(0) = 0, 0 < M_1 \leq C_m(x) \leq M_2, \|C_m(x)\|_{C^2} \leq M_3\}$.

M_1, M_2, M_3 – положительно-постоянные.

Обозначим через $\bar{C}^2(x) = \frac{r_a(x)}{2C_m(x) \cdot \rho_a(x)}$, тогда уравнение (7) будет

$$V''_{tt}(x, t) = \bar{C}^2(x) V''_{xx}(x, t) - \frac{V(x, t)}{\rho_m(x) C_m(x) \cdot l}, \quad (x, t) \in R_+^2,$$

Выпрямляем характеристики, используя метод выпрямления характеристики, т.е. введем новую переменную

$$Z(x) = \int_0^x \frac{1}{\bar{C}(\lambda)} d\lambda, \quad Z(x) > 0, \quad \lim_{x \rightarrow \infty} Z(x) = 0, \quad (12)$$

Введем также новые функции

$$C(Z(x)) = \bar{C}(x), \quad \rho_m(Z) = \rho_m(x), \quad C_m(Z(x)) = C_m(x), \quad U(Z(x), t) = V(x, t),$$

Проведем некоторые выкладки

$$\begin{aligned} V(x, t) &= U(Z(x), t), \quad V''_{tt}(x, t) = U''_{tt}(Z(x), t), \\ V'_x(x, t) &= U'_x(Z(x), t) \cdot Z'_x(x), \\ V''_{xx}(x, t) &= U''_{zz}(Z(x), t) \cdot (Z'_x(x))^2 + U'_z(Z(x), t) Z''_{xx}(x), \\ (Z'_x)^2 &= \left(\frac{1}{\bar{C}(x)} \right)^2 = \frac{1}{\bar{C}^2(x)}, \\ Z''_{xx} &= \left(\frac{1}{\bar{C}(x)} \right)' = -\frac{\bar{C}'_x(x)}{\bar{C}^2(x)} = \frac{-C'_z(Z) \cdot \frac{1}{\bar{C}(x)}}{\bar{C}^2(x)} = \frac{-C'_z(Z)}{C(Z) C^2(Z)}; \end{aligned}$$

Подставляя полученные выкладки в уравнение, получим

$$U''_{tt}(Z, t) = U''_{zz}(Z, t) - \frac{C'(Z)}{C(Z)} U'_z(Z, t) - \frac{U(Z, t)}{\rho_m(Z) C_m(Z) l}, \quad (13)$$

а начальное и граничное условие имеет вид

$$U(Z, t)|_{t=0} \equiv 0, \quad U'_z(Z, t)|_{Z=0} = C(0)[h_0 \delta(t) + r_0 \theta(t) + \rho_0 \theta_1(t)], \quad (14)$$

Дополнительная информация имеет вид

$$U(Z, t) = f(t), \quad t \in [0, T]. \quad (15)$$

Обратная задача (13) – (15) заключается в определении функции $C(Z)$ и $U(Z, t)$ при известных коэффициентах $\rho_m(Z), l$.

Определив функцию $C(Z)$ из формулы

$$C(Z) = \frac{ra(Z)}{2C_m(Z) \rho_a(Z)} \quad (16)$$

можем определить один из этих коэффициентов, т.е. $ra(Z)$ или $C_m(Z)$ или $\rho_a(Z)$.

Из принципа конечной зависимости области решения гиперболических задач от области определения его коэффициентов и от начальных граничных условий, а также продолжая все входящие функции в уравнении четным образом на полупространство $R_- = \{Z \in R, Z < 0\}$, задачу можно рассматривать в области:

$$\Delta(T) = \left\{ (Z, t) \in R \times R_+, \quad Z \in \left(-\frac{T}{2}, \frac{T}{2} \right), \quad Z < t < T \right\}.$$

Представим теперь решение прямой задачи (13) - (14) в виде

$$U(Z, t) = \tilde{U}(Z, t) + \delta(Z)\theta(t - |Z|) + R(Z)\theta_1(t - |Z|), \quad (17)$$

здесь $\tilde{U}(Z, t)$ – непрерывная функция, т.е. выделим особенности решения задачи (13)-(14) по разработанному методу В.Г.Романова [7].

Вычитаем каждый производной:

$$\begin{aligned} U''_{tt}(Z, t) &= \tilde{U}''_{tt}(Z, t) + S(Z)\delta'(t - |Z|) + R(Z)\delta(t - |Z|), \\ U'_z(Z, t) &= \tilde{U}'_z(Z, t) + S'_z(Z)\theta(t - |Z|) - S(Z)\delta(t - |Z|) + R'_z(Z)\theta_1(t - |Z|) + R(Z)\theta(t - |Z|), \\ U''_{zz}(Z, t) &= \tilde{U}''_{zz}(Z, t) + S''_{zz}\theta(t - |Z|) - 2S'_z(Z)\delta(t - |Z|) + S(Z)\delta'(t - |Z|) + R''_{zz}(Z)\theta_1(t - |Z|) - \\ &\quad - 2R'_z(Z)\theta(t - |Z|) + R(Z)\delta(t - |Z|) \end{aligned}$$

Подставляя все эти производные в уравнении (13), имеем:

$$\begin{aligned} &\tilde{U}_{tt}(Z, t) + S(Z)\delta'(t - |Z|) + R(Z)\delta(t - |Z|) = \\ &= \tilde{U}_{zz}(Z, t) + S''_{zz}\theta(t - |Z|) - 2S'_z(Z)\delta(t - |Z|) + S(Z)\delta'(t - |Z|) + \\ &+ R''_{zz}(Z)\theta_1(t - |Z|) - 2R'_z(Z)\theta(t - |Z|) + R(Z)\delta(t - |Z|) - \\ &- \frac{C'(Z)}{C(Z)} [\tilde{U}'_z(Z, t) + S'_z(Z)\theta(t - |Z|) - S(Z)\delta(t - |Z|) + R'_z(Z)\theta_1(t - |Z|) - R(Z)\theta(t - |Z|)] - \\ &- \frac{1}{Cm(Z)\rho m(Z) \cdot l} [\tilde{U}(Z, t) + S(Z)\theta(t - |Z|) + R(Z)\theta_1(t - |Z|)] \end{aligned}$$

После сокращения собираем члены при одинаковых $\delta(t)$, $\theta(t)$, $\theta_1(t)$ и приравниваем их к нулю:

$$\begin{aligned} \delta(t - |Z|): \quad &2S'_z(Z) - \frac{C'_z(Z)}{C(Z)} S(Z) = 0, \\ \theta(t - |Z|): \quad &S''_{zz}(Z) - 2R'_z(Z) - \frac{C'_z(Z)}{C(Z)} S'_z(Z) + \frac{C'(Z)}{C(Z)} R(Z) - \frac{1}{Cm(Z)\rho m(Z) \cdot l} \cdot S(Z) = 0 \\ \theta_1(t - |Z|): \quad &R''_{zz}(Z) - \frac{C'_z(Z)}{C(Z)} R'_z(Z) - \frac{1}{Cm(Z)\rho m(Z) \cdot l} R(Z) = 0. \end{aligned}$$

Из первого уравнения имеем

$$\begin{aligned} \frac{S'_z(Z)}{S(Z)} &= \frac{1}{2} \frac{C'(Z)}{C(Z)}, \quad \ln S(Z) = \ln \sqrt{C(Z)}, \quad S(Z) = \sqrt{C(Z)}, \\ S(Z) &= \sqrt{C(Z)} = \sqrt{\frac{ra(Z)}{\rho a(Z) Cm(Z)}}, \end{aligned}$$

$$\frac{ra(Z)}{\rho a(Z)Cm(Z)} = S^2(Z). \quad (18)$$

Учитывая (17) и связь $S(x)$ и $C(Z)$ из (13) - (15), имеем

$$U''_{tt}(Z,t) = U''_{zz} - 2 \frac{S'(Z)}{S(Z)} U'_z(Z,t) - \frac{U(Z,t)}{Cm(Z)\rho m(Z)l}, \quad (Z,t) \in \Delta(T), \quad (19)$$

$$U(Z,t) = \Big|_{t=|Z|} S(Z), \quad Z \in [0, T/2], \quad (20)$$

$$U(Z,t) \Big|_{Z=0} = f(t), \quad t \in [0, T] \quad (21)$$

Задача (19) - (21) является одномерной регулярной обратной задачей с данными на характеристиках и заключается в определении функции $S(Z)$ и $U(Z,t)$.

Определив функцию из (19) - (21), мы по формуле (18) можем определить неизвестную функцию:

$$ra(Z) = S^2(Z) \cdot \rho a(Z)Cm(Z), \quad (22)$$

$$\text{или } \rho a(Z) = ra(Z) / (S^2(Z) \cdot Cm(Z)), \quad (23)$$

Конечно - разностное решение обратной задачи (19) - (21) с данными на характеристиках.

Введем сеточную область:

$$\Delta_h(T) = \left\{ x_i = ih, i = \overline{0, N}; \quad t_k = k\tau, \quad k = \overline{0, 2N}, \quad h = \tau = \frac{T}{N} \right\}, \quad (24)$$

h, τ - шаги сетки по x, t и $h = \tau$.

Запишем разностный аналог дифференциальной обратной задачи (19) - (21), используя сеточные обозначения [8], при этом отбрасываем малые члены.

$$U''_{tt} = U''_{xx} - 2 \frac{S_i - S_{i-1}}{hS_i} \left[\frac{U_i^k - U_{i-1}^k}{h} \right] - \frac{U_i^k}{Cm_i \rho m_i l}, \quad (x_i, t_k) \in \Delta_h(T), \quad (25)$$

$$U_i^i = S_i, \quad i = \overline{0, N}, \quad (26)$$

$$U_0^k = f^k, \quad k = \overline{0, 2N}. \quad (27)$$

Если ввести обозначения $\Phi_i^k = 2 \frac{S_i - S_{i-1}}{hS_i} [U_i^k - U_{i-1}^k] - \frac{U_i^k}{Cm_i \rho m_i l}$, то из уравнения (25)

имеем

$$U_i^{k+1} = U_{i+1}^k - U_{i-1}^k + U_i^{k-1} - h^2 \Phi_i^k. \quad (28)$$

Используя рекуррентную формулу [9,10], мы можем получить разностный аналог интегральной формулы Даламбера второго порядка:

$$U_i^{k+1} = \frac{U_{i+k+1}^0 + U_{i-k-1}^0}{2} - h^2 \sum_{p=1}^k \sum_{M=1}^p \Phi_{i-k-M+2p}^M. \quad (29)$$

Теорема. Пусть решение дифференциальной задачи (19) - (20) существует и выполнены условия (11) - (12) и $U(x,t) \in C^4(\Delta(T))$.

Тогда приближенное решение обратной задачи (25) - (27), построенной конечно-разностным методом, сходится к точному решению обратной задачи (19) - (21) со скоростью порядка $O(h)$ и имеет оценку

$$\bar{U}^{k+1} \leq O(h) * \exp \left[2 \frac{\bar{S}}{\underline{S}} + h^2 \frac{1}{\underline{CM} \cdot \underline{RM} \cdot l} \right], \quad (30)$$

где \bar{U}^{k+1} , \bar{S} , \underline{S} , \underline{CM} , \underline{RM} – верхние и нижние нормы функций $U_i^k, S_i, Cm_i, \rho m_i$.

Доказательство теоремы можно произвести по методике [11].

Определяя сеточную функцию S_i из (25) - (27), определяем и сеточные функции:

$$ra_i = S_i^2 * \rho a_i Cm_i, \quad i = \overline{0, N}, \quad (31)$$

$$\text{или} \quad \rho a_i = ra_i / (S_i^2 * Cm_i), \quad i = \overline{0, N}, \quad (32)$$

$$\text{или} \quad Cm_i = ra_i / (S_i^2 \rho a_i), \quad i = \overline{0, N}, \quad (33)$$

Из формулы (31) - (33), переходя к старому переменному x , методика перехода описана в работе [11], находим старые разностные функции $(r_a)_i$ или $(C_m)_i$, $(\rho_a)_i$, $i = \overline{0, N}$, т.е. неизвестные коэффициенты одномерной обобщенной обратной гиперболической задачи (7) - (9).

Из эквивалентности обратных задач (19) - (21) и (7) - (9), из разностной $U(Z, t)$ решение прямой задачи (19) - (20), переходя к старому переменному x , т.е. из U_i^k к V_i^k находим разностное решение обобщенной прямой задачи (7) - (8).

Так как одномерная обобщенная обратная гиперболическая задача (7)-(9) эквивалента к одномерной обобщенной обратной параболической задаче (4) - (6), то неизвестные коэффициенты обратной задачи (7) - (9), $(r_a)_i$ или $(C_m)_i$ или $(\rho_a)_i$, $i = \overline{0, N}$ являются и неизвестными коэффициентами обобщенной одномерной обратной задачи параболического типа (4) - (6).

Вывод. Доказана теорема о сходимости конечно-разностного решения одномерной обобщенной обратной задачи распространения потенциала действий по нервному волокну к точному решению указанной задачи.

Литература

1. Понетаева Е.Г., Григорьян Л.Р., Богатов Н.М. Расчет изменения потенциала действия в нервном волокне. Сентябрь 7, 2016 админ Системы и приборы медицинского назначения.
2. Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., 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.
3. Селезов И.Т., Морозова Л.В. Обобщение задачи возбуждения и распространения потенциала действия по нервному волокну // Прикладная гідромеханіка, 2010. – Т.12. – N.3. – С.75–83.
4. 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.

5. 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.
6. Кабанихин С.И. Обратные и некорректные задачи. – Новосибирск: Сибирское научное издательство, 2009. – С.457.
7. Романов В.Г. Устойчивость в обратных задачах. –М: Научный мир,2004.– С304.
8. Самарский А.А. Теория разностных схем. –М: Наука,1989.
9. Кабанихин С.И. Проекционно-разностные методы определения коэффициентов гиперболических уравнений. – Новосибирск: Наука,1988. –166с.
10. Алимканов А.А. Численное решение прямой задачи геоэлектрики с мгновенным и шнуровыми источниками. Вестник КазЫПУ имени Абая. Серия “физико-математические науки”, N4(60). –2017. – С. 103–109.
11. Сатыбаев А.Дж. Конечно-разностное регуляризованное решение обратных задач гиперболического типа. – Ош: Ош обл. типография, 2001. – С.143.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 378

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ СТЕНДОВ ПО ФИЗИКЕ

Кабаев Т. преподаватель, tkabaev1947@gmail.ru

Абыкаева Н. преподаватель, nsg-83@mail.ru

Бакыт у. А., лаборант, Amantur.bakytov.kk@gmail.com

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

В статье рассмотрены проблемы усовершенствования учебных лабораторных стендов по физике в КГТУ с применением доступных смарт-устройств в виде смартфонов с фотовидеокамерами и цифрового осциллографа. Изложено описание того, как совершенствуются некоторые учебные стенды, приводятся рисунки и схемы для выполнения лабораторных работ по соответствующим разделам физики: механике, оптике, электричеству и магнетизму, атомной физике.

Ключевые слова: смартфон, видеокамера, натуральные модели, контрольно-измерительный прибор, осциллограф Hantek.

Введение

Одним из важнейших достижений современной науки, техники и технологии являются высокоточные контрольно-измерительные приборы и другие multifunctional устройства, которые успешно применяются во всех сферах человеческой жизнедеятельности, в том числе и в образовании. В учреждениях образования существует множество инструментов, приборов и натурные модели физических явлений (процессов), которые оперируют сигналами-аналогами. Ныне выпускают такие устройства в смарт-варианте, и они общедоступны. Без внимания не оставили и образование, сейчас предлагаются оригинальные аналогово-виртуальные модели физических явлений (процессов), но их приобретение затруднено из-за скудности бюджета учебных заведений.

Современный смартфон уже сложно назвать просто компьютером, ведь он умеет гораздо больше стационарного компьютера и ноутбука. Он не только прекрасно справляется с современными приложениями, но и благодаря многочисленным датчикам довольно успешно позволяет заниматься изучением современных отраслей науки [1].

Целью этой статьи является популяризация современных приборов и технологий и их практическое применение для расширения функций натурных физических моделей, которые имеются в виде лабораторных стендов в учебных заведениях с целью улучшения качества проводимых учебных занятий.

С внедрением таких устройств при работе с натурными моделями раскрываются некоторые компоненты физических явлений, ранее не всегда доступных, например:

- запись быстропротекающих и медленно протекающих физических процессов с элементами акустики, механики, электромагнетизма и визуальными эффектами;
- синхронная трансляция на аудиторию при выполнении работ на натурных моделях.

Нами проведены единичные работы по улучшению учебных процессов в лабораториях университета. Учитывая физический и моральный износ имеющихся контрольно-измерительных приборов и устройств, мы провели замену их современными и в некоторых случаях дополнительно применили «подручные» устройства.

1. Определение постоянной Ридберга, работа выполняется на монохроматоре УМ-2.

В качестве примера предлагается работа по изучению спектра излучения газов, находящихся в электрическом поле. Под действием электрического поля в газах происходит электрический разряд, сопровождающийся свечением газа [2]. Установлено, что возбужденные атомы газа излучают электромагнитные волны и в виде света имеют линейчатый спектр. Каждая линия на спектре соответствует излучению определенной длины волны. Швейцарский математик и физик И.Я. Бальмер, изучая излучения атомарного водорода, обнаружил, что в видимой области появляется красная линия длиной волны $\lambda_{кр} = 6563\text{\AA}$, голубая $\lambda_r = 4861\text{\AA}$, две фиолетовые соответственно $\lambda_{\phi} = 4340\text{\AA}$ и $\lambda_{\phi} = 4101\text{\AA}$. И, учитывая дискретность излучения, шведский физик И.Р. Ридберг для спектральной серии Бальмера предложил формулу:

$$\nu = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (1)$$

где ν – волновое число, показывающее, сколько длин волн укладывается на единице длины. $R = 1,097 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}$ – постоянная Ридберга, ее значение можно определить опытным путем, натуральное число, равное $n=3,4,5,6$, указывает номер спектральной линии.

Для исследования спектрального состава излучения газов используется устройство монохроматор-спектрометр УМ-2. По формуле Ридберга удобно вычисляется длина волны серии Пашена, Брекета и Пфунда. На занятиях физики выполняется лабораторная работа на стенде оснащенном монохроматором УМ-2, где световые излучения газа при электрическом разряде монохроматизируется и визуализируется, что видно через окуляр в виде спектральных линий. Работа выполняется студентом индивидуально, в большинстве случаях в течение учебного часа не все успевают рассмотреть данное явление, и некоторые студенты не могут увидеть через окуляр [3]. В целях выполнения данной работы одновременно с группой студентов нами был внедрен к применению обыкновенный смартфон с видеоустройством и с фотоаппаратом. Это осуществляется совмещением объектива фотовидеокамеры смартфона с окуляром монохроматора УМ-2, где можно провести фото- и видеосъемку и трансляцию по Whats'App. Для ясности прилагаем рис.1 и рис.2.



Рисунок 1 – Определение постоянной Ридберга выполняется индивидуально на монохроматоре УМ-2



Рисунок 2— Определение постоянной Ридберга группой студентов и синхронными комментариями преподавателя. Это достигается применением смартфона. На мониторе смартфона видно спектр излучения ксенона

2. Работа с устройством, демонстрирующим интерференцию света

В связи с выходом из строя в результате морального и физического износа штатных лазерных трубок этой установки были заменены на трубки китайского производства. Недостатками последних являются переменная частота излучения, этого достаточно для демонстрации известного оптического явления – интерференции света, но они не позволяют измерить геометрические размеры колец картины интерференции. Смысл данной работы заключается в измерении диаметров светлых (максимум) и темных (минимум) полос, отображенных на экране, изготовленном из миллиметровой бумаги. Фотографирование производят при четком появлении картины интерференции. При измерении диаметров колец масштаб определяется размерами клетки миллиметровой бумаги [4].

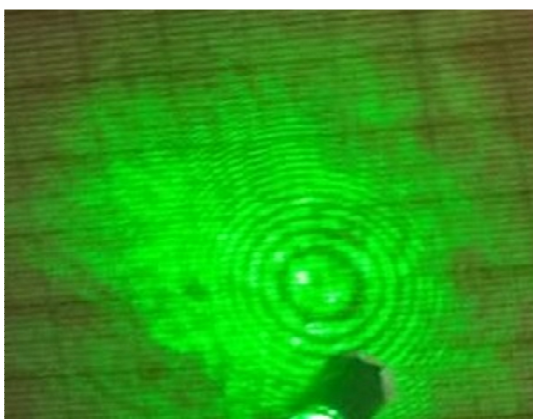


Рисунок 3 – Картина интерференции света, снятая на камеру смартфона

3. Изучение явления центрального удара шаров

Прекрасным примером для изучения законов сохранения импульса и энергии является процесс центрального прямого соударения шаров [5]. Под соударением тел в механике понимается такое их взаимодействие, которое длится очень короткое время, много меньшее времени наблюдения. В процессе удара возникают кратковременные ударные силы взаимодействия между сталкивающимися шарами, причем эти силы во много раз превосходят все внешние силы, действующие на тела. Поэтому систему соударяющихся тел во время удара можно считать замкнутой и применять к ней закон сохранения импульса.

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2, \quad (1)$$

где m_1 и m_2 – массы шаров; \vec{v}_1 и \vec{v}_2 – их скорости до удара; \vec{u}_1 и \vec{u}_2 – их скорости после удара. Это утверждение подлежит экспериментальной проверке в данной работе [6].

В лаборатории «Механика» проводится работа по изучению центрального прямого упругого удара металлических шаров, где в составе измерительной установки вмонтирован микросекундомер, предназначенный для измерения длительности контакта шаров при ударе. Для замены вышедшего из строя микросекундомера предлагается приставка-осциллограф фирмы HANTEK с фиксированным времени развертки луча. Двухлучевой осциллограф позволяет двумя лучами одновременно наблюдать на общей временной развертке два независимых процесса [7]. При интерфейсе компьютером с применением осциллографа HANTEK выполняем необходимое измерение времени и на мониторе увидим качество удара (что раньше не удавалось) [8]. Следует отметить, что для съема сигнала осциллографом существующая натуральная модель дополнена простой электрической схемой согласно рис.5. Для ясности прилагается рис.6 и рис.7.

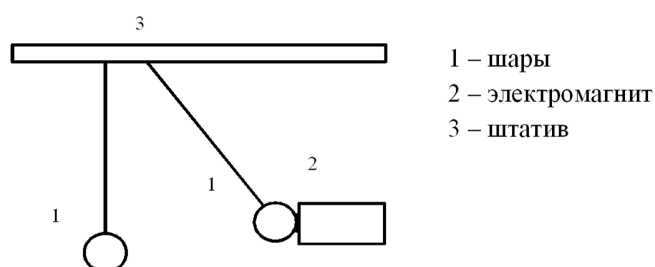


Рисунок 4 – Натурная модель соударения шаров.

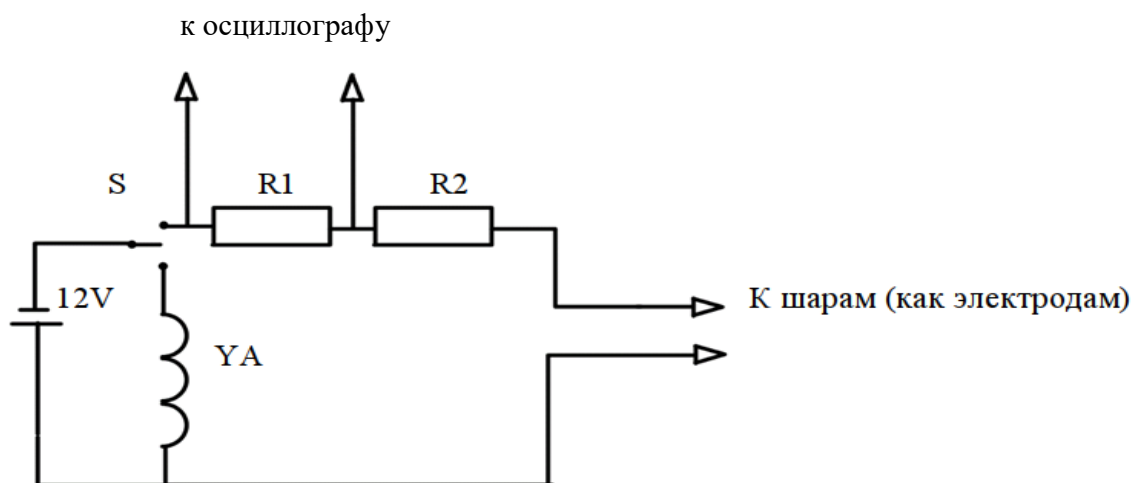


Рисунок 5 – Электрическая схема для стенда

Схема, согласно рис. 5, запускается включением тумблера S , с чем подается напряжение в цепь электромагнита YA , что обеспечивает необходимое пространственное расположение шара. При переключении тумблера S в цепь делителя напряжения $R1, R2$ и шаров

электромагнит отпускает шар, происходит соударение шаров, и в определенный промежуток времени они будут в контакте. Поскольку шары (металлические) токопроводящие, они как электрический ключ замыкают цепь, состоящую из источника 12 вольт, R1, R2 и падение напряжения на R1 является сигналом для осциллографа, сигнал появится в момент соударения и исчезнет в момент отхода шаров друг от друга.

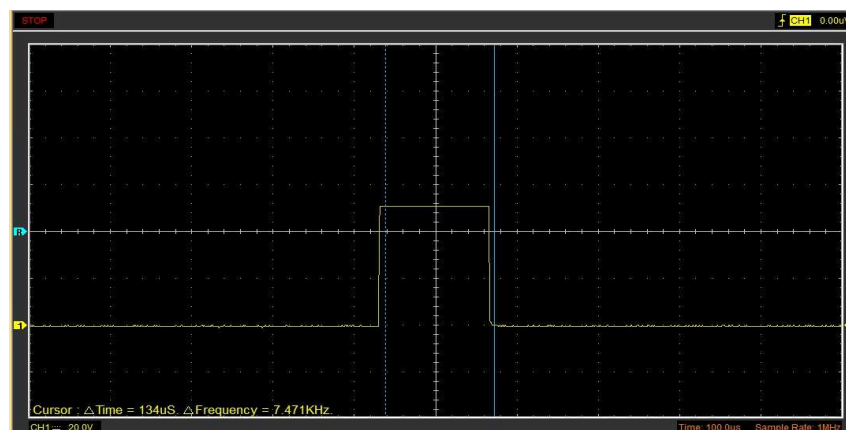


Рисунок 6 – Первое измерение с осциллографом HANTEK. Время длительности соприкосновения шаров 134 микросекунды

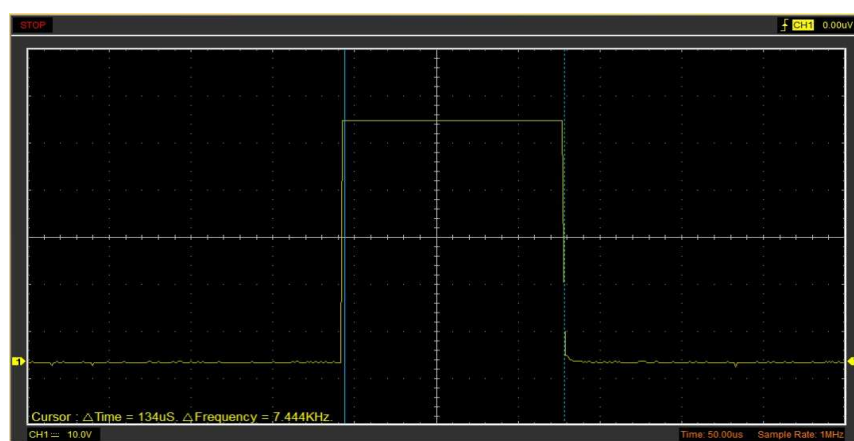


Рисунок 7 – Второе измерение с осциллографом HANTEK. Время длительности соприкосновения шаров 134 микросекунды

Отметим, что в практику нужно вводить контрольно-измерительные приборы, не заменяя реальные, а лишь дополняя их. Внедрение таких технологий в образовательный процесс оправдается, если имеются дополнительные преимущества. Познавательная деятельность студента должна направляться и корректироваться педагогами с применением новых технологий.

Стремительно развиваются информационные технологии; они становятся доступны практически каждому человеку. Одна из таких технологий – технология мобильного обучения с использованием принципа BYOD в процессе обучения физике. Принцип BYOD (Bring Your Own Devices – «возьми свое собственное устройство») – это процесс, в котором ученики активно используют смартфоны, планшеты, компьютеры и цифровые технологии в обучении [9].

В настоящее время всем приходится ежедневно использовать различную технику, в том числе компьютеры, мобильные средства связи. Поэтому молодежь заинтересована и нуждается в получении соответствующих политехнических знаний. Так как современная электронная техника и информационные технологии интересны и значимы для молодых людей, то они должны являться основным содержательным компонентом современной политехнической подготовки [10].

С развитием и распространением мобильных технологий появились новые методы преподавания. Чтобы сделать усвоение физических законов более эффективным, доступным и интересным, для студентов используем такие устройства, результаты которых зависят как от правильного определения целей и содержания образования, так и от способов достижения целей, т. е. методов. Из всей совокупности методов обучения: словесных, наглядных и практических – здесь рассматривались последние как наиболее важные для компетентного подхода [10].

Заключение

Настоящая статья написана в учебно-методических целях с элементами рационализаторского предложения. Всегда находчивость, изобретательность и креативность являлись основой решения насущных проблем. Главной целью статьи считаем пробуждение мотивации у коллег на мобилизацию поиска новых методов решения учебных проблем.

В заключение отметим, что видим мы под микроскопом или при помощи бинокля смартфоном фотографируется и выполняется аудиовидеозапись и транслируется, это эффективно в очных и в дистанционных формах обучения, в онлайн- и офлайн-режимах. Достигается рациональное и оптимальное использование времени учебного часа. Большинство работ по этим предложениям является незатратным. В счет приставки осциллографа фирмы HANTEK – они не дорогие, в зависимости от сигнальных каналов стоят от 5 до 20 тысяч сомов.

Литература

1. Пигалицын Л.В. “Физика в смартфоне”. Видеонаука №3 (19). 2020г. Россия, Нижний Новгород. стр1. <https://cyberleninka.ru/article/n/fizika-v-smartfone>.
2. Б.М. Яворский и А.А. Детлаф. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов.
3. А.М.Тынышова, К.Т.Тургунбаев, А.М. Марипов. Атомная физика: Методические указания к лабораторным работам для студентов для всех специальностей. КГТУ им. И.Раззакова. – Б: ИЦ «Техник», 2012. – 15с.
4. Абакирова Ж.А., Марипов А.М., Омуралиева К.О. Методическое руководство к лабораторным работам по оптике.
5. Султаналиева Р.М. Жуманалиев Н.Ж., Ибраимова К.Б., Байболотова Б.Б Методическое руководство к лабораторным работам по физике. Раздел «Механика».
6. <http://repo.ssau.ru/bitstream/Metodicheskie-ukazaniya/Izuchenie-uprugogo-udara-sharov-Elektronnyi-resurs-metod-ukazaniya-k-lab-rabote>. (дата обращения: 04.10.21)
7. <https://skomplekt.com/harakteristiki-ostcillograf/>. (дата обращения: 04.10.21)
8. https://www.hantek.ru/products/mans/DSO4000C_rus.pdf.(дата обращения: 04.10.21)

9. <https://ratio-natura.ru/> (дата обращения: 04.10.21)
10. <https://adu.by/be/glavnaya-stranitsa/1647-ispolzovanie-smartfonov-v-protsesse-obucheniya-fizike.html> (дата обращения: 04.10.21)
11. <https://e-koncept.ru/2021/211048.htm> (дата обращения: 04.10.21)
12. https://www.hantek.ru/products/mans/HT6022BL_RUS.pdf/
(дата обращения: 04.10.21)
13. <https://web-shpargalka.ru/hantek-6022be-instrukcija-na-russkom.php/>.

УДК 004.8: 621.315.23

СИСТЕМА ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОНЛАЙН-МОНИТОРИНГА ПОДЗЕМНЫХ СИЛОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

Верзунов С.Н., к.т.н., verzunov@hotmail.com

Институт машиноведения и автоматики НАН КР, Бишкек, Кыргызская Республика

В работе описана система искусственного интеллекта для обнаружения, классификации и локализации неисправностей в трехфазной силовой подземной кабельной линии среднего напряжения с использованием глубоких нейронных сетей на основе CNN и LSTM моделей, использующая специализированное программное обеспечение для получения большого набора данных для обучения глубоких нейронных сетей, и изложена процедура подготовки данных, необходимых для обучения

Ключевые слова: кабельная линия, мониторинг, глубокое обучение, CNN, LSTM

Введение. Подземные кабельные сети в современных городах получили широкое распространение благодаря их многочисленным преимуществам. В то же время из-за их конструктивных особенностей часто оказывается невозможным локализовать возникающие неисправности путем визуального осмотра. Решить эту проблему позволила бы система мониторинга неисправностей в режиме реального времени для их обнаружения и классификации. Такая система может быть основана, например, на применении метода кривых Лиссажу [1] и использовании машины опорных векторов, одного из методов поверхностного машинного обучения для классификации неисправностей. Известно большое количество работ, посвященных системам классификации и обнаружения неисправностей, возникающих в системе передачи, например [2, 3], основанных на схожих принципах.

Рекуррентные нейронные сети, широко используемые для обработки временных рядов, обрабатывают элементы ряда последовательно, с применением информации, полученной при обработке предыдущих его элементов, также могут использоваться в таких системах. Кроме рекуррентных нейронных сетей, для обработки временных рядов можно использовать сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Network, CNN) благодаря их способности к свертыванию параметров, извлечению признаков из локальных входных шаблонов, получению эффективных и модульных представлений данных. Объединение одномерной CNN и сети LSTM позволяет сочетать преимущества обоих методов глубокого обучения, что показано в работах [4, 5, 6], в которых гибридные CNN-LSTM сети превосходили альтернативные технологии машинного обучения в решении некоторых задач классификации и регрессии. Однако в области локализации повреждений в подземных кабельных линиях эти технологии глубокого обучения пока еще не нашли широкого применения.

Цель настоящей работы – разработать систему искусственного интеллекта (СИИ) для обнаружения, классификации и локализации неисправностей в трехфазной силовой подземной кабельной линии среднего напряжения с использованием глубоких нейронных сетей на основе CNN и LSTM моделей.

Задачами настоящей работы являются:

– моделирование неисправностей подземных силовых кабельных линий с использованием специализированного программного обеспечения PSCAD/EMTDC (<https://www.pscad.com/>) для получения большого набора данных для обучения глубоких нейронных сетей и разработка способа предварительной обработки полученных данных;

- разработка архитектур глубоких нейронных сетей, входящих в состав предлагаемой СИИ.
- оценка точности определения неисправностей с помощью обученных нейронных сетей.

Моделирование подземной кабельной линии. Рассмотрим, например, процесс, сопровождающий возникновение короткого замыкания в подземной кабельной линии. Построим имитационную модель этой линии (рис. 1) в PSCAD/EMTDC, состоящую из трехфазного неразветвленного кабеля. Данное программное обеспечение позволяет задать рабочее напряжение, частоту, материал, сечение кабеля и параметры нагрузки, такие, как, например, ее активная и реактивная мощность. С помощью этой модели можно имитировать 10 различных неисправностей (см. табл.1), например, трехфазное замыкание на землю (ФФЗ), замыкание одной из фаз на землю (ФЗ), межфазное замыкание (ФФ), межфазное замыкание на землю (ФФЗ) с различными условиями возникновения неисправности для того, чтобы получить большой набор данных для обучения глубоких нейронных сетей.



Рисунок 1 – Схема подземной кабельной линии

Генерирование данных. Точность работы любой СИИ очень сильно зависит от качества и количества образцов в обучающем наборе данных. Для того чтобы получить статистически значимый набор данных, все параметры рассматриваемой модели варьируются в некоторых пределах, и для каждой возможной комбинации генерируется соответствующая выборка данных. Это позволяет получить достаточное количество разнообразных данных для обучения нейронных сетей. Пусть, например, неисправность возникает в интервале времени моделирования $t=200-220$ мс в зависимости от заданной фазы напряжения, а предохранитель срабатывает через 150 мс после возникновения короткого замыкания. Генерируется два набора данных: первый для обнаружения и классификации неисправности, а второй для локализации неисправностей. Параметры модели, используемые для генерации данных, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры модели, используемые для генерации наборов данных

Параметр модели	Значения параметров для первого набора данных	Значения параметров для второго набора данных
Фаза напряжения при возникновении неисправности, градусы	0, 18, 36, 54,.....288, 306, 324, 342	0, 36, 72, 108, 144, 160, 192, 228, 324
Импеданс короткого замыкания, Ом	0.01, 0.1, 1, 5, 10, 15	0.01, 1, 5, 10
Тип неисправности	ФЗ(АЗ, БЗ, ВЗ), ФФЗ(АБЗ, БВЗ, АВЗ, АБВЗ, ФФ(АБ, БВ, АВ),	ФЗ (АЗ, БЗ, ВЗ)
Местоположение (удаление от источника) неисправности, км	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20	0.2, 0.4, 0.6, 0.8,.....19.4, 19.6, 19.8, 20

Значения параметров, приведенных в таблице 1, должны быть выбраны таким образом, чтобы с определенным шагом перекрывать значения, которые могут встретиться в реальных условиях, так как обученные нейронные сети могут правильно распознать и обработать только такие входные данные, встречавшиеся в обучающей выборке.

Таким образом, при использовании всех возможных комбинаций значений параметров модели генерируется 12000 выборок данных. Все сгенерированные данные имеют частоту дискретизации 8 кГц. Для имитации реальных условий добавляется аддитивный белый гауссовский шум с отношением сигнал/шум от 20 до 60 дБ, его амплитуда выбирается случайным образом для каждого образца в наборах данных. Из сгенерированных выборок с помощью скользящего окна вырезаются участки шириной 100 мс для формирования двух наборов данных – для сетей, отвечающих за классификацию и локализацию неисправностей. Затем наборы данных случайным образом перемешиваются и разделяются в отношении 5:1 для обучения и проверки работы глубоких нейронных сетей.

Архитектура предлагаемой СИИ. Для решения поставленной задачи предлагается использовать глубокие нейронные сети, основанные на комбинации одномерных сверточных сетях Conv-1D и LSTM-сетях для классификации и локализации неисправностей в подземных кабельных линиях.

Выход Conv-1D сети h_c после операции свертки, может быть описан формулой:

$$h_c(c_i) = b(c_i) + \sum_{j=0}^{l_c-1} w(c_i, j) \odot x(j) \quad (1)$$

где x – входной тензор, w – матрица весов, b – вектор смещения, c_i – i -й выходной канал; l_c – размерность входа; \odot – оператор, означающий кросс-корреляцию.

К результату свертки затем применяется нелинейная функция активации, такая, как, например, RelU, и результат преобразуется с помощью операции одномерного пулинга (снижение разрешения входной последовательности путем взятия максимального значения h_p из соседних в обрабатываемой последовательности):

$$h_p(c_i, j) = \max_{m=0, \dots, l_k-1} h_c(c_i, (l_s * j) + m), \quad (2)$$

где l_k и l_s означают длину ядра пулинга и длину шага соответственно.

Далее результат преобразуется в вектор и передается в рекуррентную LSTM-сеть. В рекуррентных нейронных сетях для реализации обратной связи используется комбинация скрытого состояния на предыдущем шаге и текущих входных данных в слое с нелинейной функцией активации, например, такой, как гиперболический тангенс. В LSTM-сети обратная связь реализуется аналогично, но нейронных слоев используется не один, а четыре. Скрытое состояние LSTM-сети h_t в момент t по состоянию h_{t-1} на предыдущем шаге находится по формулам:

$$i = \sigma(W_i h_{t-1} + U_i x_t), \quad (3)$$

$$f = \sigma(W_f h_{t-1} + U_f x_t), \quad (4)$$

$$o = \sigma(W_o h_{t-1} + U_o x_t), \quad (5)$$

$$g = \text{th}(W_g h_{t-1} + U_g x_t), \quad (6)$$

$$c_t = (c_{t-1} \otimes f) \oplus (g \otimes i), \quad (7)$$

$$h_t = \text{th}(c_t) \otimes o. \quad (8)$$

Здесь i , f и o – векторы, называемые входной вентиль, вентиль забывания и выходной вентиль, а операторы \otimes , \oplus – тензорное произведение и сумма соответственно. Все они вычисляются по одним и тем же формулам, но разными матрицами весов W_i , W_f , W_o и U_i , U_f , U_o . Сигмовидная функция σ модулирует выход вентиля, приводя его к диапазону от 0 до 1, так что порождаемый выходной вектор можно умножить поэлементно на другой вектор, чтобы определить, какая часть второго вектора может пройти через первый. Вентиль забывания определяет, какую часть предыдущего состояния h_{t-1} желательно пропустить дальше. Входной вентиль определяет, какую часть внутреннего состояния передать следующему слою. Внутреннее скрытое состояние g вычисляется на основе текущего входа x_t и предыдущего скрытого состояния h_{t-1} . Зная i , f , o и g , можно вычислить состояние ячейки c_t в момент t как сумму произведений c_{t-1} на вентиль f и g на входной вентиль i . Наконец, скрытое состояние h_t в момент t вычисляется путем умножения памяти c_t на значение выходного вентиля [7].

В целом СИИ для обнаружения, локализации и классификации неисправностей с применением предобработки скользящим окном показана на рис. 2. В процессе работы системы мгновенные значения токов и напряжений сохраняются в буфере соответствующего размера. Скользящее окно требуется для того, чтобы уменьшить длину данных на входе нейронной сети, разбив многомерные входные данные напряжения и тока на более мелкие фрагменты, которые можно быстро обработать с помощью нейронных сетей.

Возьмем для определенности скользящее окно длиной в 800 отсчетов (100 мс). Сеть для классификации неисправностей использует, в отличие от сети, описанной в работе [8], трехмерные сигналы тока и напряжения, также как и сеть для определения местоположения неисправности, измеряемые со стороны источника с помощью специальных высоковольтных измерительных средств. Таким образом, окно размером 6×800 «перемещается» по сигналу (рис. 2), сохраненному в буфере, и каждый участок передается в первую сеть для классификации неисправности, имеющую два выхода, соответствующих определенной неисправности и времени ее возникновения.

Если прогнозируемый класс неисправности не соответствует классу «исправно», то используется вторая сеть для локализации неисправности (ФЗ, ФФ, ФФЗ, ФФФ). Окно размером 6×800 с трехмерными сигналами тока и соответствующими сигналами напряжения передается во вторую сеть для определения местоположения неисправности, имеющую один выход, соответствующий расстоянию до места возникновения неисправности. В онлайн-системе мониторинга этот процесс повторяется бесконечно (рис.2), где текущее окно обозначается как w_t , включающее данные между текущим временным шагом $t-799$ и t включительно. После того, как сети обработают эти данные, процесс повторяется для следующего окна w_{t+1} , содержащего данные между временным шагом $t-798$ и $t+1$ и включительно. Постобработка результатов необходима для получения окончательной оценки времени возникновения, типа и местоположения неисправности из множества выходных данных, генерируемых по нескольким окнам.

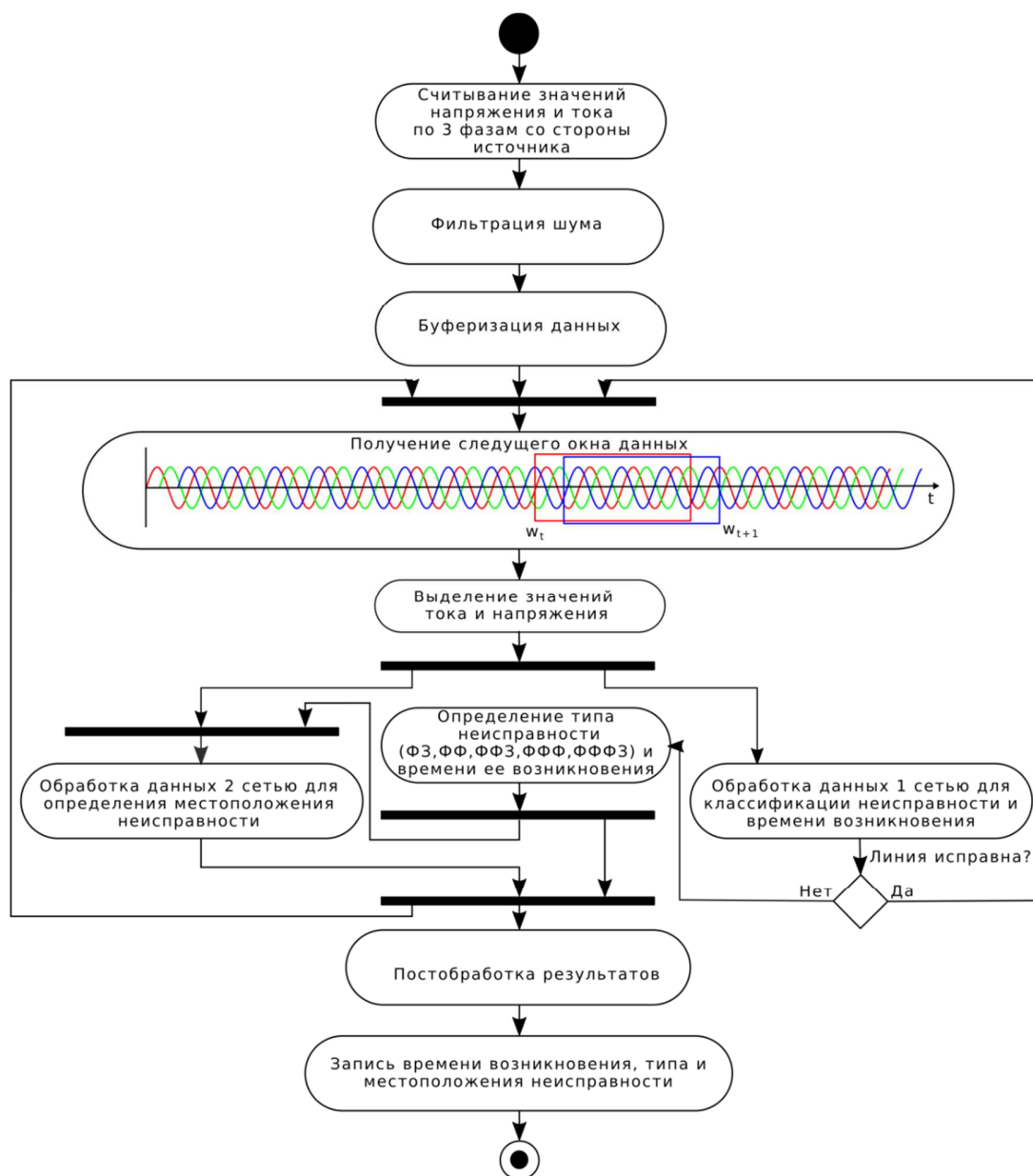


Рисунок 2 – Схема работы предлагаемой системы мониторинга

Для окон, не содержащих данные о возникновении неисправности, первая сеть должна возвращать ноль, для остальных окон должен возвращаться номер отсчета, соответствующий времени начала неисправности, относительно начала окна – целое число от 1 до 800. Тогда время возникновения неисправности тогда может быть вычислено как:

$$t(w_i) = t_i + \frac{t_i - 799}{f_s} t_f \neq 0 \quad (9)$$

где t_f – номер отсчета, соответствующий возникновению неисправности и f_s – частота дискретизации. Среднее всех полученных значений и используется для окончательной оценки времени возникновения неисправности.

Тип неисправности будет оставаться постоянным большую часть времени, однако может колебаться в окнах, где происходит переход между различными возможными значениями. Чтобы избавиться от подобной неопределенности, необходимо выбрать класс, возникающий наибольшее количество раз после предполагаемого начала неисправности. Местоположение неисправности определяется только для окон данных, определенных как содержащие информацию о неисправности. Среднее значение всех полученных на выходе сети значений используется для получения окончательной оценки расстояния до места возникновения неисправности.

Архитектура глубокой нейронной сети для определения типа неисправности. На рис. 3 показана возможная архитектура нейронной сети для обнаружения и классификации

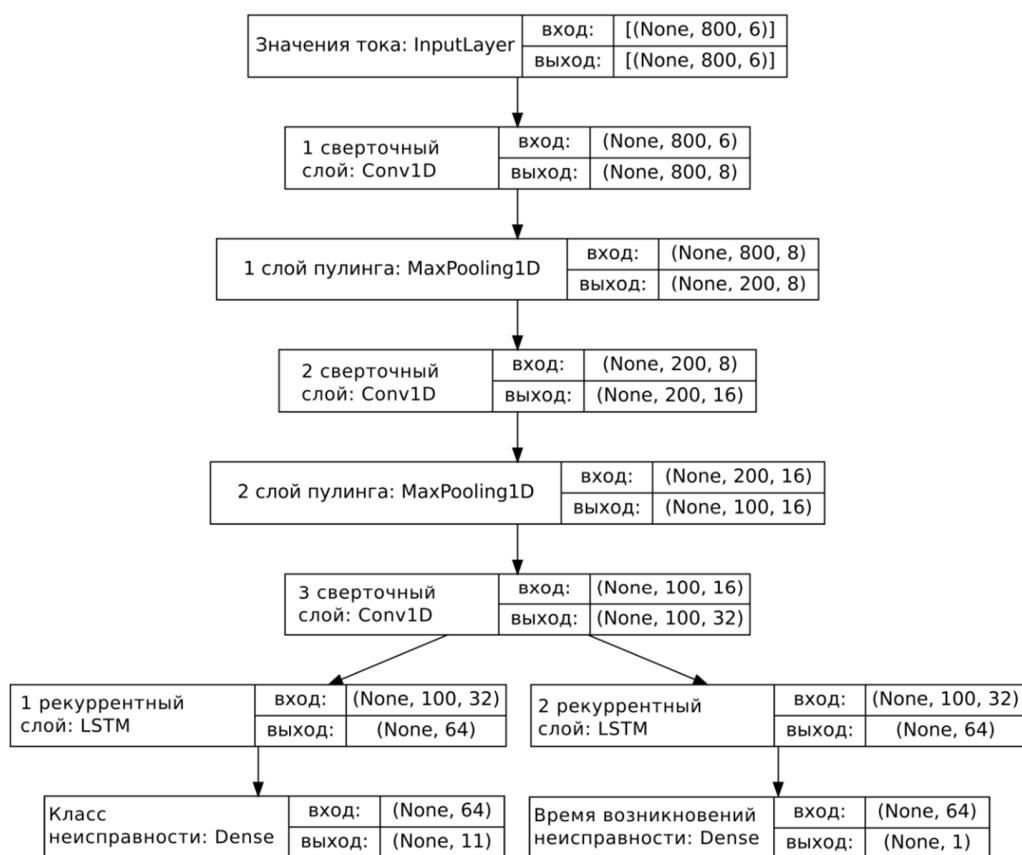


Рисунок 3 – Архитектура глубокой нейронной сети для определения класса неисправности и времени ее возникновения

неисправностей в подземной кабельной линии. Помимо 10 типов возможных неисправностей, имеется дополнительный класс «исправно» для предотвращения появления случайных выходных значений сети при отсутствии неисправности. По сравнению с определением местоположения неисправности, их классификация является более простой задачей. Но для повышения точности эта сеть использует и значения тока и напряжения. Чтобы получить набор данных для этой сети, окно размером 100 мс скользит по каждой выборке данных, и для каждой выборки вырезаются два участка. Обрезка выполняется таким образом, чтобы в результате получилось не менее 20 % данных после возникновения неисправности. Должно

получиться 24000 образцов по 2400 на каждый тип неисправности. Образцы, соответствующие классу «исправно», можно получить путем случайной обрезки участков с менее чем 20 % данных после возникновения неисправности. Важно сделать это таким образом, чтобы количество образцов, соответствующих классу ИСП («исправно»), было таким же, как и в других классах, что необходимо для получения сбалансированного набора данных. В общей сложности должно получиться 26400 образцов, из которых 21120 будут использоваться для обучения, а 5280 для тестирования нейронной сети. Обнаружение возникновения неисправности с использованием перехода от класса «исправно» к одному из других классов может оказаться сложным из-за возникновения множества таких переходов в какой-то момент времени.

В работе [2] был предложен фильтр, устраняющий эту неопределенность. Однако он может вызвать значительную задержку в обнаружении неисправности, даже несмотря на относительно высокую частоту дискретизации. Поэтому участки с меньшим количеством данных после возникновения неисправности (<20%) не используются для обучения этой сети. Тем не менее, сложность в определении точного времени возникновения неисправности сохраняется, а это является важным для данной СИИ. В связи с этим предлагается использовать нейронную сеть Conv1D-LSTM с двумя выходами, способную не только классифицировать неисправность, но и определять время ее возникновения. Это можно использовать для улучшения работы второй сети, определяющей местоположение неисправности, так, например, и для управления силовым предохранителем.

Сеть состоит из трех одномерных сверточных слоев с размером ядра 41 и 8, 16, 32 фильтрами в каждом слое с функцией активации ReLU. Слой пулинга с размером ядра, равным 4, используется после первого сверточного слоя, в отличие от [8], и, кроме того, для сверточных слоев используется каузальное дополнение по краям, не разрушающее временной порядок данных [9]. Полученный результат затем дублируется, и каждая копия подается на свой LSTM-слой с 64 ячейками без преобразования в вектор, в отличие от [8], так как LSTM-слой способен обрабатывать временные ряды любой размерности. Полносвязные слои следуют за обоими LSTM-слоями. Первый слой с функцией активации softmax состоит из 11 нейронов, на выходе которых получают вероятности принадлежности входного образца к одному из классов. Второй слой содержит 1 нейрон с линейной функцией активации, на выходе которого получается номер отсчета, соответствующий началу возникновения неисправности в текущем входном образце. Для образцов, не содержащих неисправности, этот выход должен быть равен 0. Для обучения сети можно использовать оптимизатор ADAM [10] со скоростью обучения $l_r = 10^{-5}$. Для выходного слоя в качестве функции потерь lf_1 используется мультикатегориальная кроссэнтропия:

$$lf_1 = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{10} y_{ij} \ln \widehat{y}_{ij} \quad (10)$$

где y_{ij} – вероятность i -го обучающего образца, соответствующего j -му классу, \widehat{y}_{ij} – вероятность того, что i -й обучающий образец на выходе сети будет соответствовать j -му классу и n – общее количество обучающих образцов. Для выходного слоя другой сети необходимо использовать среднеквадратическую ошибку lf_2 :

$$lf_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\widehat{y}_i - y_i)^2, \quad (11)$$

где y_i и \widehat{y}_i – фактический и определяемый сетью номер отсчета, соответствующий началу возникновения неисправности.

Архитектура глубокой нейронной сети для определения местоположения неисправности. Архитектура сети для определения местоположения неисправности в кабельной линии показана на рис. 4, на вход сети поступают 6-мерные данные для значений

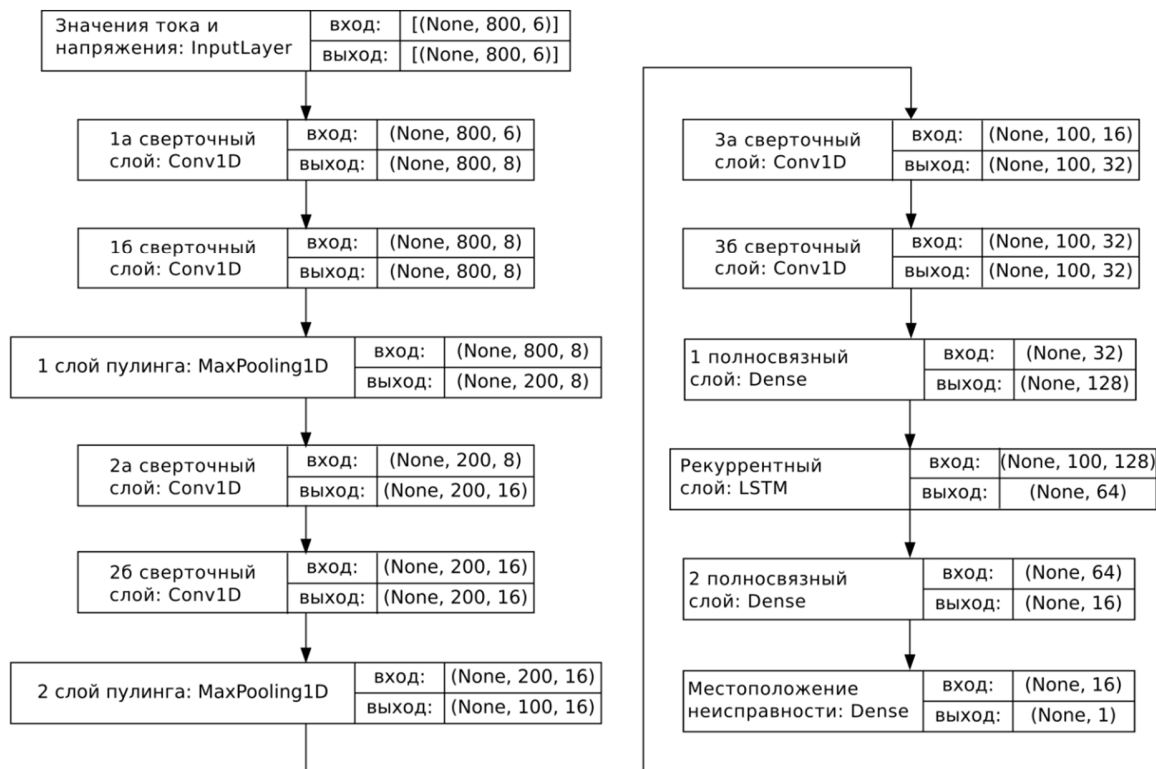


Рисунок 4 – Архитектура глубокой нейронной сети для определения местоположения неисправности

тока и напряжения по 3 фазам. Так как эта задача является более сложной, по сравнению с предыдущей, для ее решения необходимо использовать более глубокую нейронную сеть. Поэтому можно поступить так, как описано в работе [8], взяв 2 подряд идущих сверточных слоя, за которыми следует слой пулинга, и повторить этот шаблон 3 раза. Далее следует полносвязный слой для сжатия размерности данных, а потом LSTM-слой и еще один полносвязный слой перед выходным слоем, состоящим из одного нейрона с линейной функцией активации для определения местоположения неисправности. Вход этой сети также является двумерным с формой 800х6 отсчетов из образцов, обрезанных таким образом, чтобы присутствовало не менее 20% данных после возникновения неисправности, так чтобы данные, не содержащие информации о неисправности, гарантированно не использовались для обучения этой сети, так как эта сеть задействуется только в случае возникновения неисправности. Из каждой выборки модельных данных нужно взять по 5 фрагментов, что в сумме дает 60000 образцов, 48 000 для обучения и 12000 для тестирования нейронной сети соответственно.

Таким образом, эта сеть состоит из 3 стеков сверточных слоев, по 2 слоя в каждом, аналогичным тем, что использовались в первой сети. После каждого слоя, кроме первого, следует слой пулинга с размером ядра, равным 2, после первого слоя используется пулинг

с размером ядра 4, для того чтобы сократить количество входных данных и ускорить работу нейронной сети.

Затем следует полносвязный слой со 128 нейронами и слой LSTM из 64 ячеек. И еще один полносвязный слой с 16 нейронами идет перед выходным слоем с одним нейроном и линейной функцией активации. Для более стабильного обучения глубокой сети можно использовать оптимизатор ADAM с $l_r = 10^{-5}$ и уменьшающейся в 2 раза скоростью обучения, если обнаруживается, что функция потерь изменяется незначительно (к примеру, меньше чем на 5% за 5 эпох обучения). В качестве функции потерь используется средняя квадратическая ошибка, рассчитываемая по формуле (11), где y_i и \hat{y}_i – фактическое и определяемое сетью местоположение неисправности в i -м обучающем образце.

Результаты работы обученной сети для определения типа неисправности на тестовых модельных данных показаны в табл. 2. Общая точность на модельных данных составила 99.71%, по каждому классу минимальная и максимальная точность составляет 99.31% и 100% соответственно. Таким образом, сеть способна обнаружить и классифицировать неисправность с достаточно высокой точностью, причем небольшое количество ошибок связано в основном с неисправностями типов ФЗ и ФФЗ из-за схожести их сигналов.

Таблица 2 – Матрица ошибок и точность определения каждого класса неисправностей

		Действительный тип неисправности										
		АЗ	БЗ	ВЗ	АБЗ	БВЗ	АВЗ	АБ	БВ	АВ	АБВЗ	ИСП
Определенный сетью тип неисправности	АЗ (100%)	581	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	БЗ (100%)	0	603	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	ВЗ (99.84%)	0	0	616	0	1	0	0	0	0	0	0
	АБЗ (99.33%)	1	0	0	591	0	0	3	0	0	0	0
	БВЗ (99.51%)	0	0	0	0	605	0	0	3	0	0	0
	АВЗ (99.31%)	0	0	0	0	0	578	0	0	4	0	0
	АБ (99.65%)	0	0	0	2	0	0	575	0	0	0	0
	БВ (99.52%)	0	0	0	0	3	0	0	628	0	0	0
	АВ (99.82%)	0	0	0	0	0	1	0	0	564	0	0
	АБВЗ (99.84%)	0	0	0	0	0	0	0	0	1	615	0
	ИСП (100%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	619

Авторы работы [11] провели исследование различных способов обработки данных, и их влияние на точность классификации. Ими было обнаружено, что использование сигналов напряжения и тока повышает точность по сравнению с использованием только сигналов тока или напряжения. Однако они показывают, что это улучшение незначительно, так как на низких частотах значения напряжения не содержат достаточно информации относительно класс неисправности. Поэтому в предложенной СИИ используется частота дискретизации 8 кГц, что достаточно для того, чтобы получить большую точность классификации, по сравнению с результатами, полученными в работе [8].

Средняя абсолютная ошибка при определении времени возникновения неисправности время равно 0.35 мс. С учетом наличия аддитивного шума и относительно низкой частоты дискретизации 8 кГц (0.125 мс) такую ошибку можно считать вполне удовлетворительной.

На рис. 5 представлен график абсолютной погрешности определения времени возникновения неисправности, в зависимости от образцов входных данных. Образцы отличаются начальными отсчетами внутри окна, соответствующими началу возникновения неисправности. Например, первая слева точка на рис. 5 соответствует среднему абсолютному значению ошибки, в которых неисправность возникает в пределах первых 40 точек окна (или в течение первых 5 мс) данных.

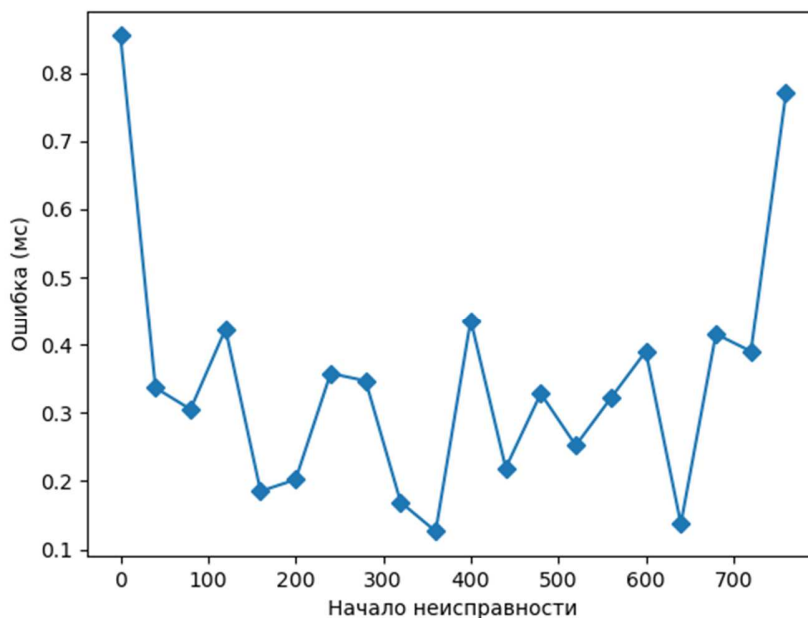


Рисунок 5 – Зависимость ошибки определения времени возникновения неисправности от ее положения в образце данных

Можно заметить, что средняя абсолютная ошибка для образцов, в которых неисправность, возникает на краях, относительно больше. Это можно объяснить тем, что в сеть не имеет достаточно данных для обнаружения неисправности в таком небольшом интервале времени. Результаты работы сети для определения местоположения неисправности показаны на рис. 6. На этом графике показаны средние абсолютные ошибки определения местоположения неисправности в зависимости от расстояния до ее локализации. Например, первая точка соответствует среднему значению абсолютной ошибки местоположения неисправности для образцов исходных данных, где неисправность возникает на первом километре кабеля. В целом средняя абсолютная ошибка при определении местоположения неисправности составляет 0.11% (или 21.4 м), что немного меньше, чем получено в работе [8]. Улучшение можно объяснить увеличенной в два раза частотой дискретизации исходных данных. Таким образом, СИИ позволяет определить местонахождение неисправности с достаточно высокой точностью, что может значительно облегчить ручной поиск точного места расположения неисправности.

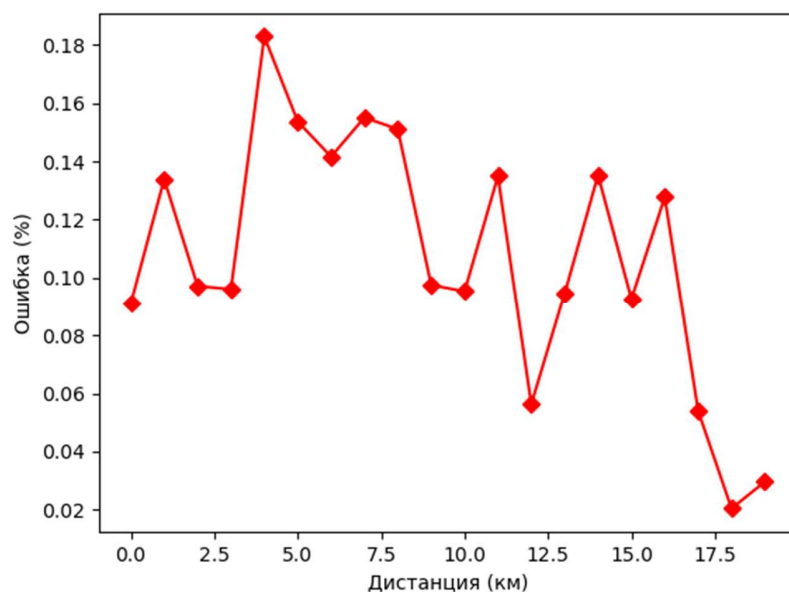


Рисунок 6 – Зависимость ошибки определения местоположения неисправности в зависимости от расстояния до нее

Заключение. В настоящей работе предложена СИИ для онлайн-мониторинга неисправностей подземных кабельных линий, использующая специализированное программное обеспечение для получения большого набора данных для обучения глубоких нейронных сетей, и изложена процедура подготовки данных, необходимых для обучения. Кроме того, предложены архитектуры глубоких нейронных сетей на основе Conv1D и LSTM-слоев. Был собран большой набор данных по описанному способу, и использован для обучения глубоких нейронных сетей. Показаны результаты работы предложенной СИИ на модельных данных. В дальнейшем планируется проверить возможность использования предложенной СИИ для решения поставленной практической задачи в реальных условиях.

Литература

1. Patel B, Bera P. Detection of power swing and fault during power swing using Lissajous figure // IEEE trans power deliv. – 2018. – N 33(6). – P. 3019–3027
2. K. R. K, Dash PK, A new real-time fast discrete S-transform for cross-differential protection of shunt-compensated power systems // IEEE Trans Power Deliv. – 2013. – N 28(1). – P. 402–410
3. Mohd Amiruddin AAA, Zabiri H, Taqvi SAA, Tufa LD Neural network applications in fault diagnosis and detection: an overview of implementations in engineering-related systems // Neural Comput Appl. –2020. – N 32(2). – P. 447–472
4. Верзунов С.Н. Применение глубоких нейронных сетей для краткосрочного прогноза дальности видимости // Проблемы автоматики и управления. – 2019. – № 1 (36). – С. 118–130.
5. Zhang F, Liu Q, Liu Y, Tong N, Chen S, Zhang C. Novel fault location method for power systems based on attention mechanism and double structure GRU neural network // IEEE Access. – 2020. – N 8. – P. 75237–75248

6. Qiao M, Yan S, Tang X, Xu C. Deep convolutional and LSTM recurrent neural networks for rolling bearing fault diagnosis under strong noises and variable loads // IEEE Access. – 2020. – N 8. – P. 66257–66269
7. Антонио Джулли, Суджит Пал. Библиотека Keras – инструмент глубокого обучения. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 294 с.
8. Swaminathan, R., Mishra, S., Routray, A. et al. A CNN-LSTM-based fault classifier and locator for underground cables // Neural Comput & Applic. 2021. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06153-w>
9. <https://arxiv.org/abs/1609.03499v2> (дата обращения: 07.06.21)
10. <https://arxiv.org/abs/1412.6980v9> (дата обращения: 07.06.21)
11. Chen K, Hu J, He J Detection and classification of transmission line faults based on unsupervised feature learning and convolutional sparse autoencoder // IEEE Trans Smart Grid. - 2016. - N9(3). – P. 1748–1758

УДК 004.46:621.313.12

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА В СРЕДЕ NI LABVIEW

*Иманакунова Ж. С. к.т.н., доцент, j.imanakunova@gmail.com,
jeniks.73@mail.ru*

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

Рассматривается виртуальный прибор (ВП) в среде NI LabVIEW для демонстрации динамического поведения генератора вблизи границ области его устойчивости, работающего на систему неограниченной мощности. Установлено, что в такой системе могут наблюдаться динамические режимы различной сложности – от стационарного режима до аттракторов различных типов. Обнаружение хаотических явлений является актуальной задачей, так как детерминированный хаос из-за своей непредсказуемости – определенно недопустимое явление с точки зрения динамической устойчивости его работы. Возможность ВП продемонстрирован на конкретном примере.

Ключевые слова: виртуальный прибор, генератор, динамический хаос, моделирование, устойчивость, синхронная машина

Введение

Система уравнений, применяемая для анализа динамической устойчивости генераторов (синхронных машин), обычно нелинейна. Для подобных систем колебания будут протекать по-разному, в зависимости от того, мала или велика их амплитуда, и, кроме того, период колебаний в них оказывается зависящим от амплитуды. Другая особенность заключается в том, что в некоторых нелинейных системах имеется возможность возникновения самопроизвольно колебательного процесса, характеристики которого определяются свойствами самой системы и не зависят от конкретных начальных условий [1]. Кроме сказанного, широкий класс объектов, описываемых системами нелинейных дифференциальных уравнений, способен демонстрировать хаотическое поведение (детерминированный хаос) [1, 2, 3], суть которого состоит в появлении при определённых условиях хаотических режимов даже в достаточно простых нелинейных системах дифференциальных уравнений [4].

Выяснение основных особенностей хаотического движения может иметь существенное значение при исследовании устойчивости нелинейных колебаний систем, которая возникает в самых различных областях [5], в том числе генераторах при критическом режиме их работы [6].

1. Постановка задачи

Поставлена задача продемонстрировать возможности виртуального прибора (ВП) для изучения динамических свойств генератора при значительных возмущениях режима на конкретных примерах.

Такая постановка задачи особенно полезна для расширения научного кругозора студентов, изучающих курс «Электромеханические переходные процессы», и для знакомства с возможностями NI LabVIEW [7,12].

Сначала изложим основные моменты работы [8], где был разработан ВП в среде NI LabVIEW с использованием отдельных результатов [9] для численного исследования и моделирования режимов работы генератора вблизи границ области его устойчивости.

2. Численное решение нелинейного уравнения генератора

Уравнения движения генератора, работающего на СНМ (система неограниченной мощности), и его электрическая мощность записываются в виде [10]:

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

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

где $\tau_J = 2H$ – в секундах; H – постоянная инерции машины; ω – угловая частота и её номинальное значение ω_t – в радиан/секундах; $d^2\delta/dt^2$ – угловое ускорение в $\delta\ddot{\alpha} / c^2$; $P_{\dot{O}}$, $P_{\dot{E}}$ – соответственно мощность первичного двигателя, и электромагнитная мощность генератора в относительных единицах.

Уравнение движения (1) в исходном режиме, записанное для конкретного синхронного генератора, работающего на СНМ через трансформатор и двухцепную линию электропередачи, имеет при $P_T = 0.8$, $P_m = 2.222$ следующий вид [10]:

$$\frac{10}{377} \frac{d^2\delta}{dt^2} = (0.8 - 2.222 \sin \delta). \quad (3)$$

Исходное значение угла $\delta_0 = 21.09^\circ = 0.367 \text{ рад}$. Начальное ускорение ротора:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = 37.7 [0.8 - (2.222 \cdot \sin 0.367)] = 0.102 \text{ рад} / c^2. \quad (4)$$

Напряжение на шинах системы $U = 1$ В. Реактивное переходное сопротивление генератора по продольной оси – 0.2 В, реактивное сопротивление трансформатора – 0.1, реактивное сопротивление каждой из двух цепей линии электропередачи – 0.4, все величины отнесены к базовому значению номинальной полной мощности генератора. В исходном режиме машина выдавала активную мощность 0.8. Напряжение на выводах 1.05. Постоянная инерция машины $H = 5 \text{ МДж} / (\text{МВ} \cdot \text{А})$. Активное сопротивление не учитывается.

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

Численно устойчивый и быстродействующий решатель для параллельного метода дан авторами работы [9] методом второго порядка с диагональной коррекцией (далее Д2).

Такой метод реализован при разработке виртуального прибора в среде моделирования LabVIEW. Лицевая панель – интерфейс виртуального прибора – показана на рис. 1:

Благодаря возможностям ВП исследователь может выделить из исходного движения ротора его составляющие, т.е. единственное гармоническое колебание с наибольшей амплитудой и остаточный сигнал.

Рассмотрим изменение угла ротора во времени $\delta(t)$ и фазовый портрет на примере уравнения движения машины (3), смоделированном численным методом Д2, при следующих исходных параметрах моделирования: исходное значение угла ротора $\delta_0 = 21.09^\circ = 0.367 \text{ рад}$ и его начальное ускорение $0.102 \text{ рад} / c^2$ (4); механическая мощность $P_{мх} = 0.8$; электрическая мощность $P_m = 2.222$; номинальная угловая частота $\omega_{ном} = 377 \text{ рад} / c$; постоянная инерции машины $H = 5$ с; расчеты проведены методом Д2 с шагом интегрирования по времени, равным 0.0001.

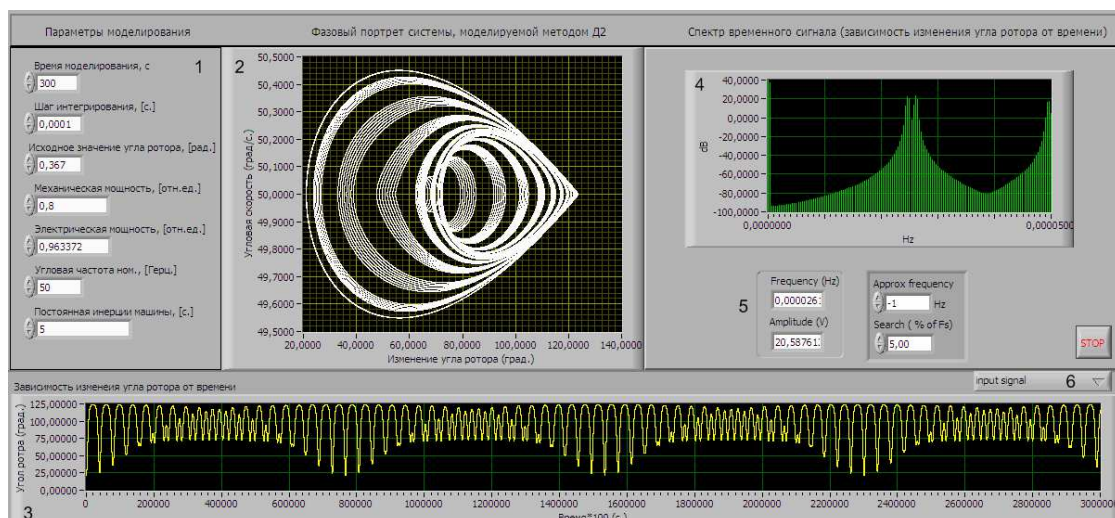


Рисунок 1– Лицевая панель ВП для изучения динамического свойства генератора 1 – элементы для ввода параметров моделирования (длительность моделирования и шаг интегрирования в секундах, исходное значение угла ротора в радианах, механическая и электрическая мощности в относительных единицах, угловая частота в герцах); 2 – (XY Graph) графический индикатор для отображения фазового портрета (по оси X–изменение угла ротора в градусах; по оси Y –угловая скорость ротора в град./с); 3 – виртуальный осциллограф для отображения зависимости угла ротора от времени; 4 – графический индикатор для отображения спектра входного сигнала; 5 – на этих элементах отображаются значения частоты и амплитуды найденного гармонического колебания; 6 – кнопка, при нажатии которой выводятся на экран варианты отображаемых выходных сигналов, таких, как исходный сигнал; синусоидальная составляющая исходного сигнала; остаточная составляющая исходного сигнала.

Представленный виртуальный прибор позволяет исследователю моделировать работу генератора и анализировать влияние всех параметров модели на режим его работы. Поставим задачу по определению степени влияния значений параметров P_m уравнения движения генератора (2) на режим его работы. Для решения такой задачи воспользуемся разработанной ВП для проведения численного эксперимента при различных значениях параметра P_m и неизменных значениях остальных.

3. Результаты численного эксперимента вынесены в таблицы (1, 2, 3)

Таблица 1. Графическое представление режима работы генератора при $P_m = 2.222$

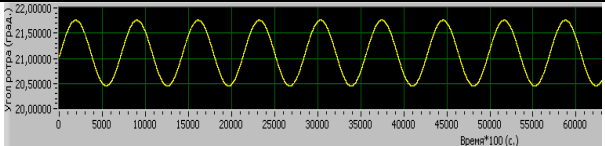
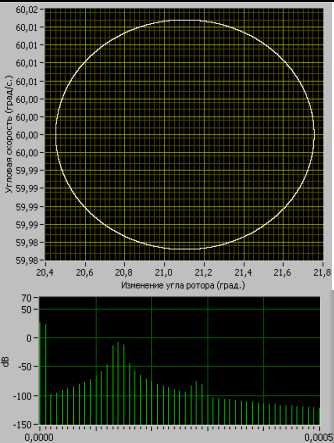
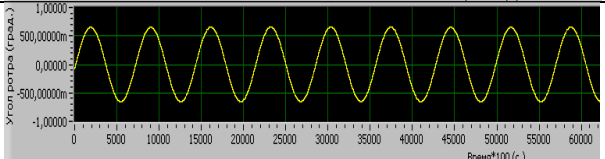
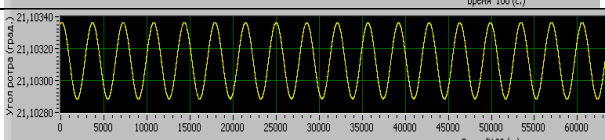
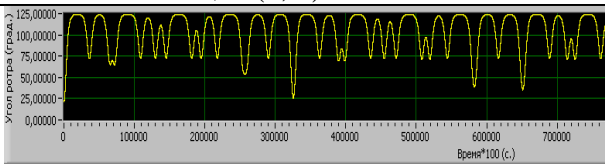
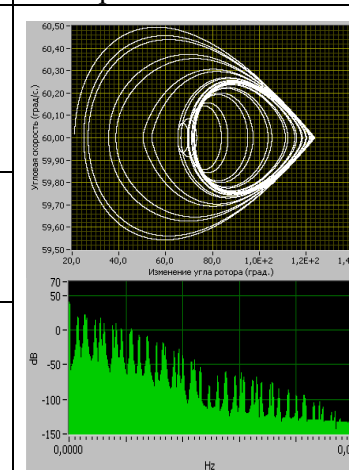
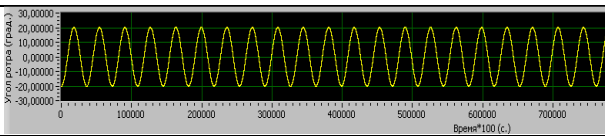
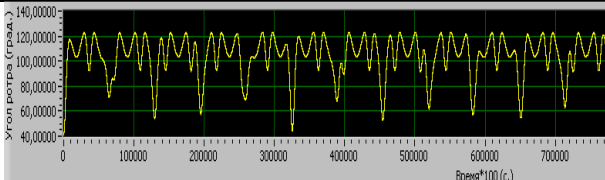
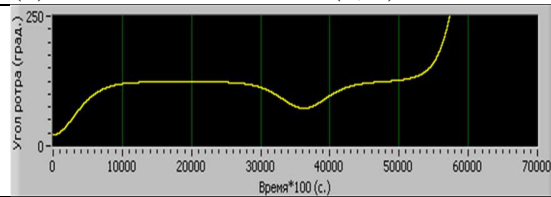
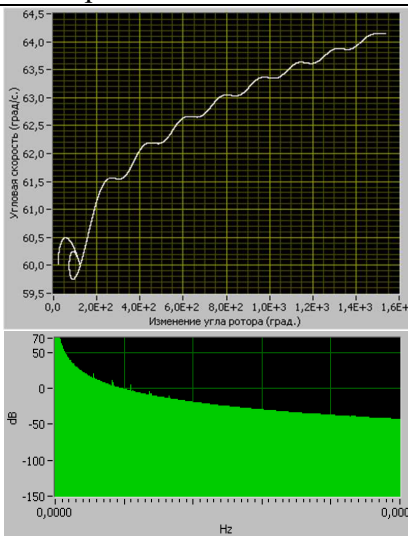
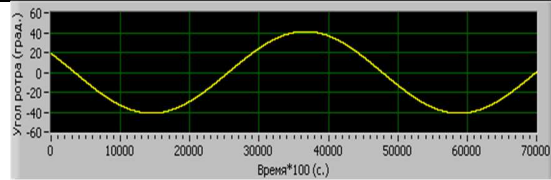
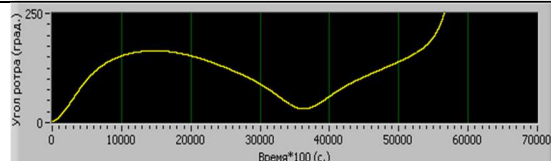
	Закон изменения угла ротора во времени (1) и его составляющие (2,3)	Фазовый портрет и спектр
1 $\delta(t) = \delta_1(t) + \delta_2(t)$		
2 $\delta_1(t)$		
3 $\delta_2(t)$		

Таблица 2. Графическое представление режима работы генератора при $P_m = 0,9633518548$

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

В таблице 2 представлены результаты численного эксперимента при моделировании динамического поведения генератора вблизи границ области его устойчивости, а в таблице 3 – потери устойчивости работы генератора.

Таблица 3. Графическое представление режима работы генератора при $P_m = 0.9633518547$

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

В первых строках таблиц (1–3) содержатся графики изменения угла ротора $\delta(t)$ по времени, во-вторых и третьих строках – его составляющие, т.е. единственные гармонические колебания с наибольшей амплитудой и остаточные составляющие.

В правых частях таблиц содержатся фазовые портреты и спектры зависимости $\delta(t)$. В фазовых портретах представлены фазовые траектории. Координаты каждой точки траектории показывают значения угла δ ротора в градусах (ось абсциссы) и его угловой скорости в град/с (ось ординат) в текущий момент времени t .

Заключение

В статье представлены результаты исследования, дающие картину перестройки динамического поведения модели (3) генератора при изменении параметра электрической мощности P_m . При уменьшении этого параметра от исходного значения $P_m = 2.222$ и при приближении к значению $P_{mex} = 0.8$ наблюдаются явления сложной динамики, связанные с возникновением различных аттракторов (табл. 1–3).

В фазовом пространстве (табл. 1) устойчивому режиму отвечает состояние равновесия системы. Хаотическому аттрактору (табл. 2) соответствует такой режим, когда $\delta(t)$ изменяется стохастично и спектр состоит из множества узких линий, соответствующих самим колебаниям, и широкой подложки, отвечающей «случайным» колебаниям. В таком режиме возможно возникновение высших гармоник тока и напряжения. Выяснено, что в системе наблюдается потеря устойчивости режима (таб. 3) при $P_m = 0.9633518547$

Литература

1. Wiggins S. Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos. Springer-Verlag, Telos, 1997.
2. Schuster H.G., Just W. Deterministic Chaos: An Introduction, 4th edition. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2005.

3. Sprott J.C. *Elegant Chaos: Algebraically Simple Chaotic Flows*. World Scientific, Singapore, 2010.
4. Сидоров С.В. Структура решений и динамический хаос в нелинейных дифференциальных уравнениях. Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика. – № 2. 2013. – С. 45–63.
5. Заславский Г.М., Чириков Б.В. Стохастическая неустойчивость нелинейных колебаний // Успехи физических наук. –1971. –Т. 105. – №1. – С. 3– 39.
6. Imanakunova Zh.S, Satarkulov K., Baibagysova D.Zh., Kadieva A.K. Using LabView environment for the demonstration of generator dynamic behavior / E3S Web of Conferences 58, 03011 (2018) [Электронный ресурс] <https://www.e3s-conferences.org/>
7. <https://www.scopus.com/results/authorNamesList.uri?sort=count-f&src=al&sid=128745a07febc723cb12c3971ed1755a&sot=al&sdt=al&sl=25&s=AUTHLASTNAME%28Imanakunova%29&st1=Imanakunova> (дата обращения: 30.09.2021)
8. Суранов А.Я. *LabVIEW 8.20: Справочник по функциям*. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 536 с.
9. Иманакунова Ж.С., Сатаркулов К., Байбагызова Д.Ж., Кадиева А.К. Применение среды LabView для демонстрации динамического поведения генератора / Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 69. Надежность развивающихся систем энергетики. В 2-х книгах. / Книга 2 / Отв. ред. Н.И. Воропай. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2018. – 440 с.
10. Бутусов Д.Н., Островский В.Ю., Красильников А.В. Моделирование нелинейных динамических систем параллельными численными методами интегрирования// Фундаментальные исследования (технические науки) №12. – 2014. – С. 1873–1877.
11. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость / Пер. с англ// Под ред. Я.Н. Лугинского. – М.: Энергия, 1980. – 568 с., ил.
12. Абыкаева Н.А., Кабаев Т.К. Разработка виртуального прибора в среде LABVIEW для исследования характера переходного процесса в электрических цепях // Проблемы автоматизации и управления. – 2021. – № 1 (40). – С. 3–11.

УДК 004.89

Лыченко Н.М., Сорокова А.В., nlychenko@mail.ru, nastusha24sh-g@yandex.com

Институт машиноведения и автоматизации НАН КР, Бишкек, Кыргызстан

МОДИФИКАЦИЯ КЛАССИФИКАТОРА ИНДЕКСА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА Г. БИШКЕК С УЧЕТОМ ФАКТОРА ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Представлены результаты анализа и использования информации о количестве тонн ежедневно сжигаемого угля на ТЭЦ г. Бишкек для повышения точности прогноза класса индекса качества воздуха (AQI) на основе LSTM-нейронного классификатора. Этот классификатор позволяет в зависимости от метеорологических условий и предшествующей истории значений AQI прогнозировать класс AQI из возможных четырех интегрированных классов: $AQI \leq 50$ / $50 < AQI \leq 100$ / $100 < AQI \leq 150$ / $AQI > 150$. Учет фактора загрязнения в качестве дополнительного входа классификатора позволил получить прогноз класса AQI с точностью не менее 80%.

Ключевые слова: классификация, прогноз, индекс качества воздуха, LSTM-нейронная сеть, факторы загрязнения

Введение. В работах [1, 2] построены модели прогноза концентрации в атмосферном воздухе г. Бишкек твердых частиц размером менее 2.5 микрона (PM 2.5) и прогноза класса индекса качества воздуха (AQI, Air Quality Index) [3] из возможных четырех интегрированных классов: $AQI \leq 50$ («Хороший»), $50 < AQI \leq 100$ («Умеренный»), $100 < AQI \leq 150$ («Нездоровый для чувствительных групп»), $AQI > 150$ («Нездоровый», «Очень нездоровый», «Опасный»). В качестве признаков (факторов) в этих моделях использована доступная информация [4] о метеорологических параметрах: используются исторические ряды наблюдений за температурой воздуха, температурой точки росы, атмосферным давлением, относительной влажностью воздуха, скоростью ветра, интенсивностью осадков. Эти модели вполне можно использовать для оценки загрязненности воздуха в зависимости от метеофакторов: достигнутая точность прогноза в моделях на основе обобщенно-регрессионной нейронной сети GRNN – около 70%, на основе LSTM-нейронной сети – около 75%. Однако стоит признать, полученные результаты в большой степени зависят от выборки наблюдений и не показывают устойчивости прогноза. Это можно объяснить тем, что использование при построении прогноза только метеофакторов недостаточно, хотя, конечно, синоптические процессы и локальные метеорологические условия во многом определяют поведение поступающих в атмосферу загрязняющих веществ. Вследствие этого построению прогнозных моделей на основе метеофакторов посвящено множество работ, например [5, 6, 7]. Безусловно, важным фактором в процессах загрязнения атмосферного воздуха в городах являются техногенные (антропогенные) источники загрязнения. Поскольку г. Бишкек не располагает в настоящее время крупным промышленным производством, основными факторами загрязнения являются автотранспорт, городская ТЭЦ, котельные и выбросы печей частного сектора в отопительный период. Интересным представляется учесть по возможности эти факторы при построении моделей прогноза.

В апреле 2021 года ОАО «Электрические станции» КР представило Институту машиноведения и автоматизации НАН КР информацию о количестве тонн ежедневно сжигаемого на ТЭЦ г. Бишкек угля и его марке за период с 9 февраля 2019 года по 31 марта 2021 года. В настоящей работе представлены результаты анализа и использования этой информации для модификации модели прогноза класса индекса качества воздуха г. Бишкек на основе LSTM-нейронного классификатора [2].

2. Данные загрязнения атмосферного воздуха г. Бишкек. В исследовании использованы данные о загрязнении атмосферного воздуха г. Бишкек, размещенные на сайте [8]. Данные включают индекс качества воздуха AQI и данные о концентрации в воздухе твердых частиц PM2.5 (mkg/m^3), начиная с 06.02.19 по настоящее время (период измерения – 1 час).

На рисунках 1 и 2 представлены временные ряды (ВР) изменения содержания PM2.5 в атмосферном воздухе и индекса качества воздуха г. Бишкек за период с 09.02.2019 по 31.03.2021 с интервалом в 3 часа (с 30.08.2019 по 04.09.2019 и с 10.12.2020 9.00 по 14.12.2020 12.00 измерения отсутствуют, поэтому на графиках эти измерения представлены средними значениями).

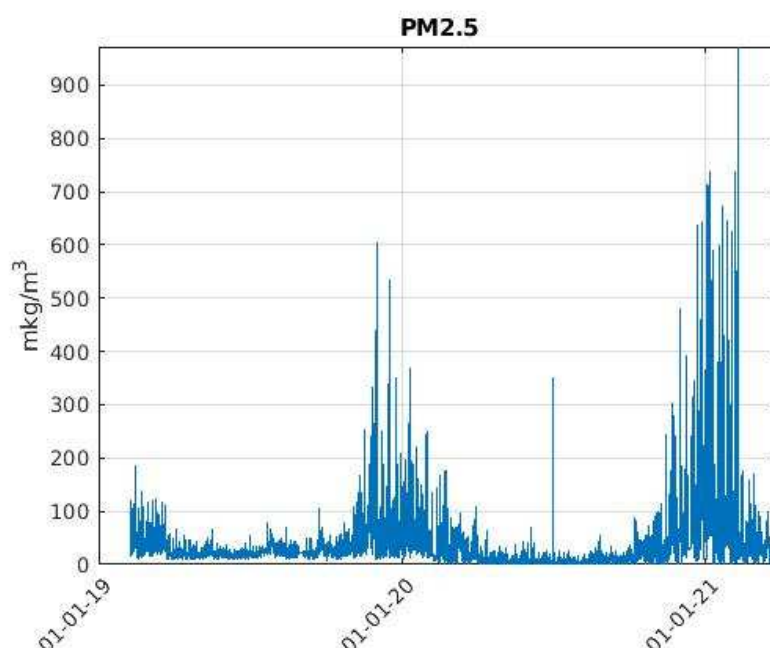


Рисунок 1 – Значения концентраций PM2.5 в воздухе г. Бишкек за период 09.02.2019-31.03.2021

На графиках (рисунки 1,2) вполне отчетливо видна сезонная составляющая: в теплое (летнее) время года средний уровень загрязненности падает, в холодное (зимнее) – повышается. Как показали предыдущие исследования [2], направленные на повышение точности прогноза нейросетевой модели, оправдано связать начало и конец холодного/теплого периодов с началом/ концом отопительных сезонов в городе.

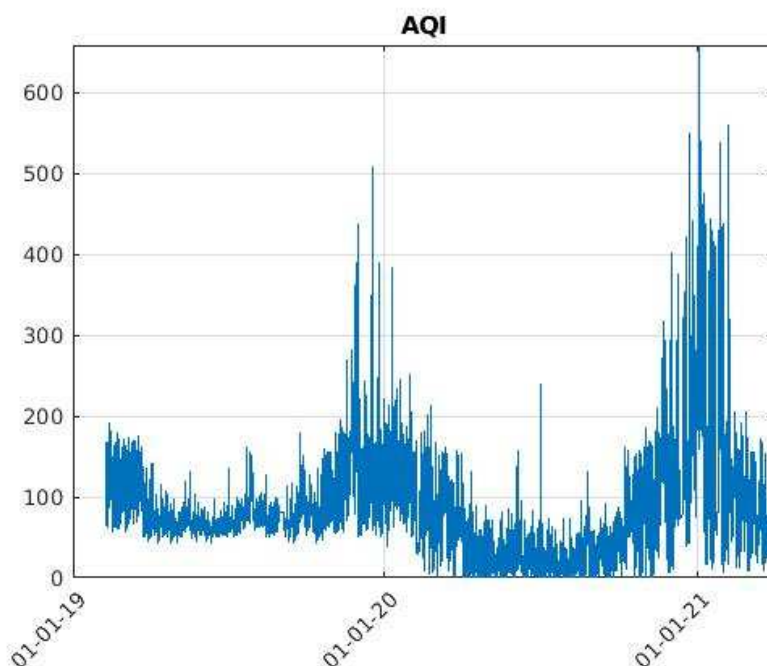


Рисунок 2 – Значения индекса качества воздуха AQI г. Бишкек за период 09.02.2019-31.03.2021

В таблице 1 представлены среднее (математическое ожидание) μ и стандартное (среднеквадратическое) отклонения σ за весь период наблюдений, а также за периоды 09.02.2019–23.03.2019, 24.03.2019–31.10.2019, 01.11.2019–31.03.2020, 01.04.2020–09.10.2020, 10.10.2020–31.03.2021, соответствующие началу и концу отопительных сезонов в городе (конец отопительного сезона в 2019 году – 22.03.2019, начало – 01.11.2019; конец отопительного сезона в 2020 году – 31.03.2020 (дата приблизительная), начало – 10.10.2020). На рисунке 3 представлены автокорреляционные функции (АКФ) ВР концентраций PM2.5 и ВР индекса качества воздуха.

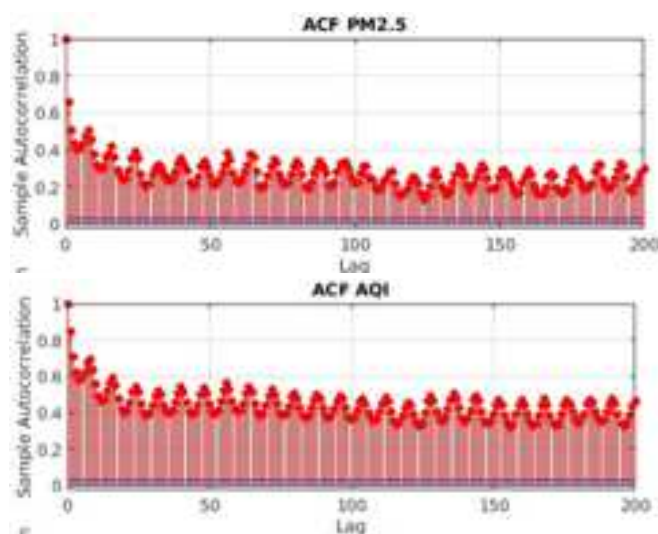


Рисунок 3 – Автокорреляционные функции временных рядов PM2.5 и AQI

Из анализа АКФ следует, что во ВР наблюдений присутствует периодичность в 8 лагов, что соответствует 24 часам. Это объясняется повторением суточной истории в процессах загрязнения: в утренние часы, как правило, уровень загрязнения ниже, чем в вечерние, что в основном объясняется физико-географическими и климатическими условиями города.

Таблица 1 – Средние значения и стандартные отклонения концентраций PM2.5 и AQI

Период наблюдений	PM2.5		AQI	
	mean, mkg/m ³	σ , mkg/m ³	mean	σ
09.02.2019-31.03.2021	37.4	65.6	83.9	67.5
09.02.2019-23.03.2019	44.0	23.8	115.1	32.9
24.03.2019-31.10.2019	22.3	10.4	70.0	21.2
01.11.2019-31.03.2020	40.7	122.0	102.2	128.9
01.04.2020-09.10.2020	6.9	8.4	26.0	23.1
10.10.2020-31.03.2021	76.1	115.2	126.9	97.8

Сравнение летних периодов 2019/20 и 2020/21 годов. Из графика (рисунок 1) и таблицы 1 видно, что в большинстве случаев значения PM2.5 в летние периоды находятся в пределах принятой в Кыргызстане нормы (35 мкг/м³). Однако при более детальном рассмотрении ВР видно, что исключение, как правило, составляет 21 час, когда достаточно много значений эту норму превышают.

Стоит отметить, что введение карантина и ЧС весной 2020 года в связи с распространением в мире COVID-19 привело к значительному (в среднем в три раза) уменьшению концентраций PM2.5, по сравнению с аналогичным (летним) периодом 2019 года. Это связано со снижением производственной и транспортной нагрузки на экологию крупных городов. На рисунке 4 приведены графики кривых, отображающих измеренные значения PM2.5 в г. Бишкек за периоды времени с 1 апреля по 30 сентября 2019 и 2020 гг. (здесь выброс в измерении 01.07.2020, 15.00 (PM2.5=349), в 50 раз превышающий среднее за летний период 2020 г., заменен на среднее значение). Учитывая, что в г. Бишкек практически отсутствуют промышленные предприятия, график концентраций PM2.5 на рисунке 4 можно расценивать как иллюстрацию влияния автотранспорта на уровень загрязнения атмосферного воздуха в городе.

Наличие некоторого количества отрицательных значений PM2.5 за летний период 2020 г. объясняется шумом при измерении, если атмосфера очень чистая (приближается к 0 мкг/м³). Поскольку отрицательные числа не имеют физического смысла, при дальнейшей обработке данных они заменены нулями.

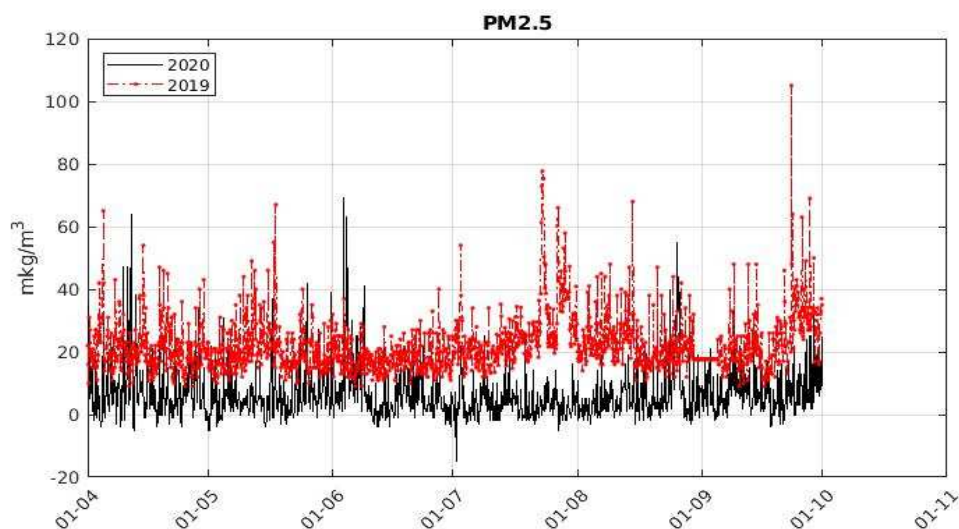


Рисунок 4 – Концентрации PM2.5 в воздухе г. Бишкек в апреле-сентябре 2020 г. и в апреле-сентябре 2019 г.

Сравнение зимних периодов 2019/20 и 2020/21 годов. Из графика на рисунке 1 и таблицы 1 видно, что значения PM 2.5 в холодные (зимние) периоды времени

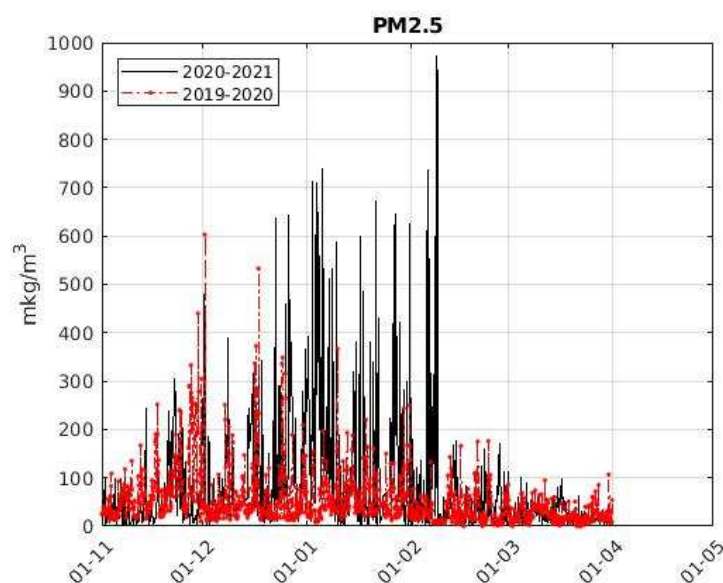


Рисунок 5 – Сравнение зимних периодов 2019/20 гг. и 2020/21 гг.

достаточно резко возрастают и зачастую значительно превышают допустимую норму. Это связано с увеличением загрязняющих атмосферу выбросов городской ТЭЦ и котельных города, производственные мощности которых обусловлены началом и концом отопительных периодов, печей частного сектора, а также с существованием длительных неблагоприятных метеорологических условий, которым свойственны температурные инверсии, слабые ветры, туманы. Стоит отметить (см. таблицу 1), что среднее значение концентрации PM2.5 в зимний период 2020/21 годов в 1.87 раза выше среднего значения концентрации PM2.5 в зимние периоды предыдущих лет. Увеличение загрязненности воздуха также иллюстрирует

рисунок 5, на котором представлены графики PM2.5 зимних периодов 2019/20 и 2020/21 годов.

На первый взгляд это может быть объяснено более низкими в среднем температурами воздуха зимой в 2020/21 гг. (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Средняя температура воздуха в зимние месяцы 2020/21 гг.

	2019-2020	2020-2021
Ноябрь	1.4	1.0
Декабрь	1.1	-4.95
Январь	-1.7	-3.8
Февраль	3.7	3.9
Март	8.2	6
Среднее за период	2.48	0.17

Однако проведенный подобно представленному в [9] корреляционный анализ температуры воздуха и концентраций PM2.5 показал, что влияние температуры атмосферного воздуха T на концентрацию PM2.5 для зимнего периода 2020/21 гг. на треть меньше, чем за предыдущие зимние периоды. В таблице 3 представлены коэффициенты корреляции температуры атмосферного воздуха T , измеренной в сроки i , $i-1$, $i-2$, ..., и концентрации PM2.5, измеренной в срок i . Сроки $i-1$, $i-2$, ..., соответствуют измерениям на 3, 6 и т.д. часов ранее. Из таблицы видно, что наиболее сильное влияние на концентрацию PM2.5 оказывает температура, измеренная в сроки $i-4$, $i-5$, $i-6$, при этом коэффициенты корреляции для периода наблюдения 26.11.2020-31.03.2021 меньше, чем для зимних периодов 2019/20 гг. для всех соответствующих сроков измерения. Этот анализ дает основания предположить, что в зимний период 2020/21 гг. появились дополнительные факторы, имеющие отношение к источникам загрязнения.

Таблица 3 – Коэффициенты корреляции $R(T/PM2.5)$ температуры атмосферного воздуха T , измеренной в сроки i , $i-1$, $i-2$, ..., и концентрации PM2.5, измеренной в срок i для зимних периодов наблюдений

Срок измерения	Период наблюдений	
	09.02.2019 – 23.03.2019 01.11.2019 – 31.03.2020	26.11.2020-31.03.2021
	$R(T/PM2.5)$	$R(T/PM2.5)$
i	-0.31	-0.19
$i-1$	-0.25	-0.15
$i-2$	-0.29	-0.20
$i-3$	-0.36	-0.28
$i-4$	-0.45	-0.35
$i-5$	-0.49	-0.36
$i-6$	-0.46	-0.34

Анализ влияния количества тонн угля, ежедневно потребляемого ТЭЦ г. Бишкек, на среднесуточные значения PM2.5. Представленные ОАО «Электрические станции» КР данные позволили провести корреляционный и регрессионный анализ среднесуточных концентраций загрязнения воздуха частицами PM2.5 и количества тонн угля, ежедневно потребляемого ТЭЦ г. Бишкек – одного из источников загрязнения атмосферного воздуха города – за период 09.02.2019 – 31.03.2021. Анализ проведен с целью выявления влияния фактора загрязнения на значения концентраций PM2.5 и дальнейшего использования этой информации для построения моделей прогноза, позволяющих предупреждать неблагоприятные экологические ситуации.

В таблице 4 представлена оценка влияния количества тонн угля *Coal*, потребляемого в день *i* на среднесуточную концентрацию *PM2.5*, измеренную в день *i*, а также показано влияние инерционного фактора, т.е. влияние количества тонн угля *Coal*, потребляемого в дни *i-1*, *i-2* (соответственно одним и двумя днями ранее), на среднесуточную концентрацию *PM2.5*, измеренную в день *i*. Из таблицы видно, что влияние практически безынерционное – коэффициенты корреляции для различных дней практически не изменяются, а также стоит отметить, что влияние достаточно существенное – коэффициент корреляции $R=0.56$.

Таблица 4 – Коэффициенты корреляции R количества тонн угля, потребляемого ТЭЦ в день *i*, *i-1*, *i-2*, на среднесуточную концентрацию *PM2.5* в *i*-й день.

День измерения	R (Coal/ <i>PM2.5</i>)
<i>i</i>	0.556
<i>i-1</i>	0.550
<i>i-2</i>	0.546

Имея наборы данных о среднесуточных концентрациях загрязнения воздуха и количестве тонн угля, ежедневно потребляемого ТЭЦ, можно так же, как и для метеорологических данных [9], рассчитать статистические зависимости между переменными, используя метод регрессионного анализа [10]. На рисунке 6 представлен график среднесуточного изменения *PM2.5* в зависимости от количества тонн угля, потребляемого ТЭЦ г. Бишкек в те же сутки, соответствующий полученному уравнению линейной регрессии:

$$PM2.5(i) = 0.764 + 0.0111 * Coal(i).$$

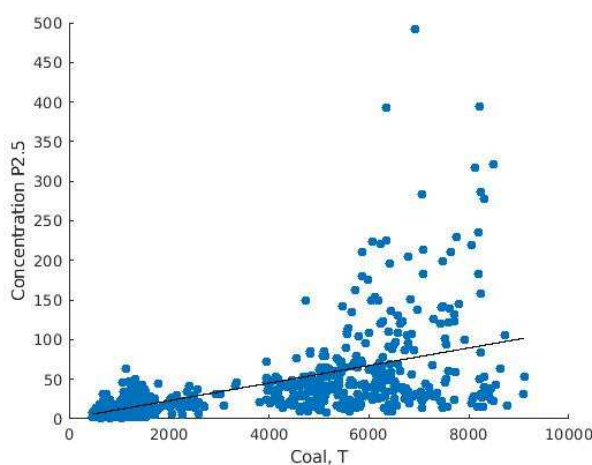


Рисунок 6 – Зависимость среднесуточных концентраций *PM2.5* от количества тонн угля, ежедневно потребляемого ТЭЦ: $PM2.5 = 0.0111 * Coal + 0.76$ для периода 09.02.2019 – 31.03.2021.

Таким образом, установленная корреляция может служить дополнительной исходной информацией для формирования более эффективных моделей прогнозирования загрязнения воздуха на основе искусственных нейронных сетей [11, 12], в частности, LSTM-нейросетевого классификатора.

Модификация LSTM-нейросетевого классификатора. Структура классификатора аналогична структуре, выбранной в [2]. Только теперь к факторам, определяющим входной вектор классификатора (который в [2] включал температуру воздуха, температуру точки

росы, атмосферное давление на уровне станции, относительную влажность, скорость ветра, интенсивность осадков), прибавился еще один фактор – количество тонн угля, сжигаемого ежедневно на городской ТЭЦ. Стоит отметить, что этот фактор также несет информацию о сезонности, поскольку границы сезонов связаны с отопительным периодом; поэтому в новом классификаторе фактора-признака сезонности нет.

Выходной вектор классификатора, как и в [2], определяется параметрами, которые характеризуют вероятности отнесения выхода классификатора к тем или иным классам индекса качества воздуха AQI из возможных четырех интегрированных классов: $AQI \leq 50$ («Хороший»), $50 < AQI \leq 100$ («Умеренный»), $100 < AQI \leq 150$ («Нездоровый для чувствительных групп»), $AQI > 150$ («Нездоровый», «Очень нездоровый», «Опасный»).

В исследовании возможностей сети по прогнозированию класса AQI варьировались следующие параметры:

S – длина последовательности векторов исторических данных входных векторов классификатора;

P – глубина прогноза (на сколько шагов вперед прогнозируется AQI). Шаг прогноза – 3 часа.

Программная реализация инструмента для проведения экспериментов извлекает данные, нормализует данные по заданной функции нормализации и по заданным S и P генерирует все возможные последовательности входных векторов классификатора длиной S и сопоставляет им значения AQI в моменты времени, удаленные на P шагов от момента последних значений этих последовательностей. В таблице 5 представлены результаты прогноза с учетом данных о количестве тонн угля, ежедневно сжигаемого на городской ТЭЦ.

Таблица 5 – F-мера [2] точности модели прогнозирования четырех классов AQI в зависимости от длины последовательности входных векторов (S) и глубины прогноза (P) для выборки наблюдений 09.02.2019-31.03.2020+01.08.2020-31.03.2021 с учетом и без учета данных ТЭЦ.

S	P	F-мера 4 класса (без ТЭЦ)	F-мера 4 класса (ТЭЦ)
8	4	0.7641	0.7945
8	8	0.7449	0.7707
8	16	0.7286	0.7749
8	24	0.7270	0.7567
8	32	0.7139	0.7736
12	4	0.7669	0.8023
12	8	0.7728	0.8013
12	16	0.7571	0.7930
12	24	0.7556	0.7876
12	32	0.7456	0.8010

Как видно из таблицы, в зависимости от глубины прогноза P и длины выборки наблюдений S , подаваемых на вход нейросетевого классификатора, точность прогноза класса AQI с учетом данных ТЭЦ выше на 3–5%, нежели без учета этих данных.

Заключение. Учет нового фактора – информации о количестве тонн сжигаемого на ТЭЦ г. Бишкек угля – позволил повысить точность прогнозирования класса AQI из четырех интегрированных классов ($AQI \leq 50$ / $50 < AQI \leq 100$ / $100 < AQI \leq 150$ / $AQI > 150$) до 80%. Это дает основание утверждать, что учет этого фактора так же, как и метеофакторов, имеет большое значение для решения важной задачи прогноза уровня загрязнения воздуха в городе.

Адекватный прогноз AQI позволит правительственным организациям в случае очень низкого качества воздуха, когда может быть нанесен значительный вред здоровью граждан, объявлять о чрезвычайной экологической ситуации и принимать меры по ограничению выбросов основных источников загрязнения воздуха до тех пор, пока не уменьшатся опасные метеорологические условия.

Благодарности. Авторы выражают благодарность отделу по связям с общественностью ОАО «Электрические станции» КР за представленную информацию о количестве тонн ежедневно сжигаемого на ТЭЦ г. Бишкек угля и его марке за период с 9 февраля 2019 года по 31 марта 2021 года.

Литература

1. Великанова Л.И., Лыченко Н.М. Мультирегрессионные и обобщенно-регрессионные нейросетевые модели краткосрочного прогноза загрязнения PM_{2.5} в г. Бишкек с учетом метеорологических параметров// Проблемы автоматики и управления. – N2. – Бишкек: Илим, 2019. – С. 42–51.
2. Лыченко Н.М., Сороковая А.В. Прогнозирование классов индекса качества воздуха г. Бишкек с учетом новых данных 2020–2021 гг. на базе LSTM-нейросетевого классификатора// Проблемы автоматики и управления. – 2021. – № 2 (41). – С. 89– 99.
3. Air Quality Index (AQI) - A Guide to Air Quality and Your Health. US EPA. 9 December 2011.
4. Сайт «Расписание погоды rp5.ru» Архив погоды в Бишкеке https://rp5.ru/%D0%90%D1%80%D1%85%D0%B8%D0%B2_%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D1%8B_%D0%B2_%D0%91%D0%B8%D1%88%D0%BA%D0%B5%D0%BA%D0%B5 (дата обращения: 30.07.2021)
5. Burhan Baran. Prediction of Air Quality Index by Extreme Learning Machines// 2019 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP) DOI: 10.1109/IDAP.2019.8875910
6. Soubhik Mahanta, T. Ramakrishnu, Rajat Raj Jha; Niraj Tailor. Urban Air Quality Prediction Using Regression Analysis//TENCON 2019 - 2019 IEEE Region 10 Conference (TENCON). Date of Conference: 17-20 Oct. 2019 DOI: 10.1109/TENCON.2019.8929517
7. M. Sharma; S. Aggarwal; P. Bose; A. Deshpande. Meteorology-based forecasting of air quality index using neural network//IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2003. INDIN 2003. Proceedings. DOI: 10.1109/INDIN.2003.1300360
8. AirNow Department of State // https://airnow.gov/index.cfm?action=airnow.global_summary#U.S._Department_of_State_Bishkek, (дата обращения: 30.07.2021).
9. Лыченко Н.М. Регрессионный анализ метеорологических факторов и концентраций частиц PM_{2.5} в атмосферном воздухе г. Бишкек // Проблемы автоматики и управления. – N2. – Бишкек: Илим, 2019. – С. 5–15.
10. Бокс Д., Дженкинс Т. Анализ временных рядов: прогноз и управление. – М.: Мир, 1974. – 242 с.

11. X. Zhao, R. Zhang, J.-L. Wu, P.-C. Chang. A Deep Recurrent Neural Network for Air Quality Classification // Journal of Information Hiding multimedia Signal Processing. – V.9, N.2, March 2018.
12. Understanding LSTM Networks. – URL: <http://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/> (дата обращения 14.09.2021).

УДК 621.3.072.3

А.Т. Асиев¹, asievat@gmail.com

Т. Кабаев¹, З.А. Узагалиев², Р.К. Мусаев¹

*¹Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова
Бишкек, Кыргызстан*

*²Открытое акционерное общество «Северэлектро»
Бишкек, Кыргызстан*

ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДЫ LABVIEW ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ КАБЕЛЯХ С ЦЕЛЬЮ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЕГО ИЗОЛЯЦИИ

В статье рассмотрены методы диагностики изоляции силовых кабельных линий (СКЛ). Для выполнения неразрушающего контроля изоляции СКЛ предложено использовать модель силового кабеля в виде цепной схемы, причем при отсутствии по длине кабеля локальных дефектов модель представлена в виде однородной цепной схемы, а при наличии локальных дефектов – в виде неоднородной цепной схемы. Методом переменных состояний для указанных схем составлена математическая модель, на основе которой разработан виртуальный прибор в среде LabVIEW. Работа прибора основана на том, что при возникновении в изоляции кабеля локальных дефектов, например, в виде водяных триингов или газовых включений, в этих местах возникают частичные разряды, поэтому при подаче на испытываемый высоковольтный кабель повышенного постоянного напряжения происходит изменение характера временных зависимостей входных напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$. В работе показано, что путем исследования характера протекания указанных электромагнитных переходных процессов при помощи разработанного виртуального прибора можно контролировать наличие локальных дефектов в изоляции СКЛ. Эффективность предложенного способа контроля подтверждена численным экспериментом.

Ключевые слова: цепная схема, переходной процесс, компьютерное моделирование, LabVIEW, схема замещения, кабельные линии, контроль состояние изоляции высоковольтных кабелей.

Введение

В большинстве развитых странах осуществлена модернизация электроэнергетики на базе инновационной платформы Smart Grid с целью обеспечения энергетической безопасности, экономической эффективности и надежности электроснабжения. Это потребовало разработки новых методов контроля состояния электрооборудования и внедрения соответствующих датчиков [1, 2].

Контроль состояния электрооборудования, в частности, оценка состояния высоковольтной изоляции силовых кабельных линий (СКЛ), необходим для принятия решений по продолжению эксплуатации СКЛ или их ремонту и замены. В соответствии с действующими нормативами такой контроль осуществляется в настоящее время обычно путем испытания повышенным напряжением. При этом известны случаи, когда положительные результаты испытаний СКЛ повышенным напряжением промышленной частоты не гарантируют последующей безаварийной эксплуатации, и СКЛ выходят из строя по прошествии некоторого времени. Причиной такого положения является интенсивные частичные разряды в дефектных местах во время испытаний, что приводит к сокращению срока службы кабельных линий. Такие испытания наиболее опасны для кабельных линий с большим сроком службы [3]. Поэтому более целесообразно использовать диагностические методы оценки состояния высоковольтной изоляции неразрушающими методами [4], не приводящими к старению

изоляции. В [3] отмечено, что к данному моменту полный переход на неразрушающую диагностику еще не произошел ни в одной стране мира, однако существуют различные методики, которые тестируются и применяются локально как в России, так и в Канаде, Израиле, странах Европы и США.

На сегодняшний день разработано множество методов неразрушающего контроля состояния изоляции СКЛ. К наиболее распространенным неразрушающим методам контроля относятся методы измерения сопротивления изоляции, диэлектрических потерь, емкости кабельных линий, коэффициента абсорбции, а также метод частичных разрядов, тепловизионный метод, рентгеновский метод, измерение и анализ возвратного напряжения, метод рефлектометрии (импульсный, высокочастотный). В [5] на основе проведенного анализа и сопоставления специфических особенностей каждого неразрушающего метода диагностики состояния изоляции СКЛ установлено, что метод высокочастотной рефлектометрии является наиболее перспективным для использования в системах диагностики СКЛ. В то же время в [5] отмечено, что стоимость применяемого оборудования в перспективных направлениях диагностики на сегодняшний день весьма значительна и рекомендуется их применять в СКЛ сверх высокого напряжения и высоко ответственных СКЛ. Поэтому остается актуальным поиск относительно простых и дешевых и в то же время достоверных способов диагностики изоляции для остальных СКЛ.

Постановка задачи

Рассмотрим метод диагностики изоляции СКЛ, основанный на исследовании характера временных зависимостей входных напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ при подаче на испытываемый высоковольтный кабель повышенного постоянного напряжения. Предполагается, что характер электромагнитных переходных процессов $u(t), i(t)$ зависит от наличия и характера локальных дефектов в изоляции СКЛ. Например, на начальном этапе эксплуатации, когда в высоковольтной изоляции СКЛ ещё отсутствуют локальные дефекты, параметры изоляции по всей длине кабеля приблизительно одинаковы и этому случаю соответствует свои зависимости $u(t), i(t)$.

Допустим через определенное время в процессе эксплуатации за счет действия различных факторов (воздействия воды, тепла и напряженности электромагнитного поля) в отдельных участках объема полимерной изоляции возникли водяные триинги или на каком-то участке СКЛ возникла полость с газовым включением, в результате которых возникают частичные разряды. Очевидно, на таких участках изоляции ее локальные параметры будут отличаться от параметров участков с исправной изоляцией, причем они будут меняться по мере зажигания и погасания разрядов, что приведет к изменению характера электромагнитных переходных процессов $u(t)$ и $i(t)$.

Подтверждения этих предположений будут даны ниже.

Решение задачи

Схема установки для решения поставленной задачи представлена на рис.1, где показаны: высоковольтный кабель с возможным локальным дефектом; регулируемый источник постоянного напряжения; ПК для обработки сигналов, получаемых от измерительного модуля USB 6009, и управления выключателем Вк. Измерительный модуль USB 6009 получает сигналы с делителя напряжения и измерительного шунта в виде зависимости $u_1(t)$, пропорциональной величине входного напряжения $u(t)$, и от измерительного шунта в виде зависимости $u_2(t)$, пропорциональной входному току $i(t)$. К измерительному модулю USB 6009 сигналы $u_1(t)$ и $u_2(t)$ поступают через клеммные колодки 2, а измерительный модуль подключается к ПК через USB кабель 4 [6, 7].

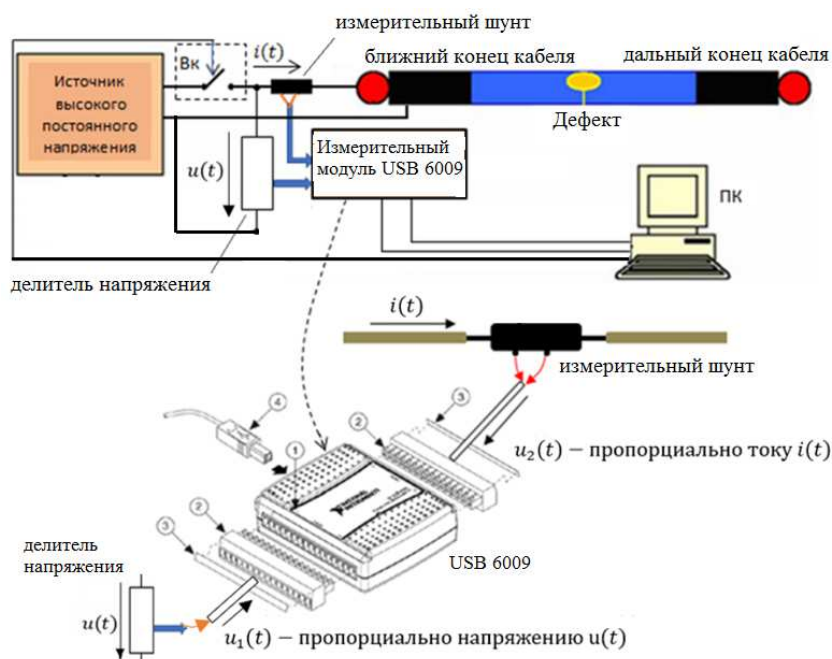


Рисунок 1 – Схема установки для измерения электромагнитных процессов $u(t)$, $i(t)$

Для обоснования вышесказанных предположений воспользуемся компьютерной моделью СКЛ разработанной на основе модели СКЛ (рис.2) в виде неоднородной цепочной схемы (НЦС) [8].

На рис.2 модель силового кабеля представлена в виде ЦС, состоящий из пяти звеньев. Переход от длинной линии с распределенными параметрами, которая является

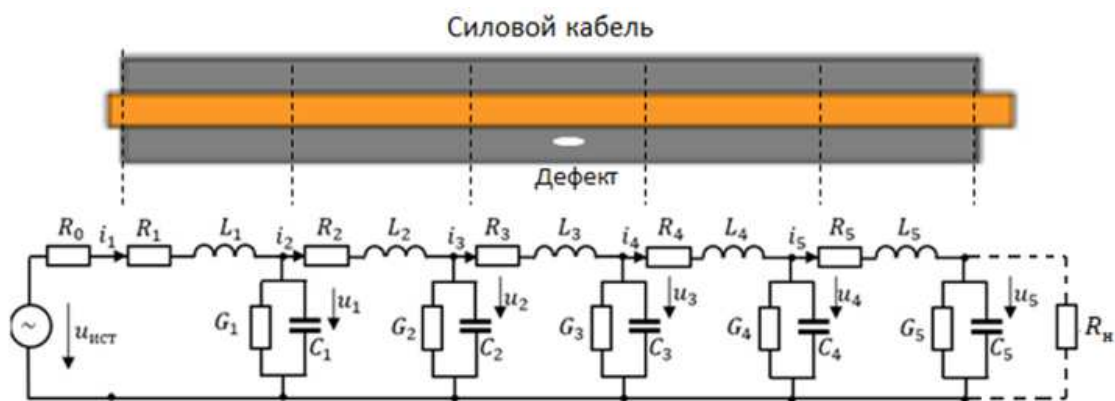


Рисунок 2 – Модель силового кабеля в виде неоднородной цепочной схемы

точной моделью СКЛ, к эквивалентной ЦС с сосредоточенными параметрами упрощает анализ электромагнитных процессов в СКЛ. Вопрос же о точности моделирования длинной линии про помощи ЦС рассмотрен автором [14], где установлено, что для большинства случаев достаточная точность моделирования достигается при $N \leq 10$, где N – число звеньев.

При построении модели СКЛ (рис.2) учтено, что однофазные высоковольтные силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, находившейся в длительной эксплуатации, следует представлять в схемах замещения как НЦС. Это связано с тем, как было отмечено выше, под воздействием воды, тепла и напряженности электромагнитного поля в отдельных участках объема изоляции могут, возникать, и расти водяные триинги (watertrees), которые снижают эксплуатационную надежность кабеля [15]. К тому же современные исследования структуры сшитой полиэтиленовой изоляции показывают наличие в ней микровключений разных размеров, конфигураций и на различных расстояниях друг от друга [16]. Очевидно, что указанные неоднородности влияют на параметры (G_i, C_i) схемы замещения СКЛ в виде ЦС, которые, в свою очередь, влияют на характер протекания электромагнитных переходных процессов $u(t), i(t)$.

Математическая модель, составленная методом переменных состояний [9], для этой цепочной схемы (ЦС) имеет вид системы уравнений (1).

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= \frac{1}{L_1} \cdot u_{\text{ист}} - \frac{R_0 + R_1}{L_1} \cdot i_1 - \frac{1}{L_1} \cdot u_1; & \frac{du_1}{dt} &= -\frac{G_1}{C_1} \cdot u_1 + \frac{1}{C_1} \cdot i_1 - \frac{1}{C_1} \cdot i_2; \\ \frac{di_2}{dt} &= \frac{1}{L_2} \cdot u_1 - \frac{1}{L_2} \cdot u_2 - \frac{R_2}{L_2} \cdot i_2; & \frac{du_2}{dt} &= \frac{1}{C_2} \cdot i_2 - \frac{1}{C_2} \cdot i_3 - \frac{G_2}{C_2} \cdot u_2; \\ \frac{di_3}{dt} &= \frac{1}{L_3} \cdot u_2 - \frac{1}{L_3} \cdot u_3 - \frac{R_3}{L_3} \cdot i_3; & \frac{du_3}{dt} &= \frac{1}{C_3} \cdot i_3 - \frac{1}{C_3} \cdot i_4 - \frac{G_3}{C_3} \cdot u_3; \\ \frac{di_4}{dt} &= \frac{1}{L_4} \cdot u_3 - \frac{1}{L_4} \cdot u_4 - \frac{R_4}{L_4} \cdot i_4; & \frac{du_4}{dt} &= \frac{1}{C_4} \cdot i_4 - \frac{1}{C_4} \cdot i_5 - \frac{G_4}{C_4} \cdot u_4; \\ \frac{di_5}{dt} &= \frac{1}{L_5} \cdot u_4 - \frac{1}{L_5} \cdot u_5 - \frac{R_5}{L_5} \cdot i_5; & \frac{du_5}{dt} &= \frac{1}{C_5} \cdot i_5 - \frac{G_5}{C_5} \cdot u_5 - \frac{1}{R_n C_5} \cdot U_5. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

На основе математической модели (1) разработан виртуальный прибор (ВП) в среде LabVIEW. Передняя панель и блок-диаграмма ВП показаны соответственно на рис.3 и рис.4.

Технология построения ВП для решения различного рода дифференциальных уравнений рассмотрены в [10, 11, 12, 13].

Описание виртуального прибора

На передней панели ВП расположены два графических индикатора (виртуальные осциллографы) для представления, соответственно, компьютерных осциллограмм переходного процесса напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ на входе модели КЛ в режиме включения линии на постоянное напряжение.

Слева и справа от графических индикаторов расположены кнопки для управления сигналами, которые направляются на экраны осциллографа. Например, на рис. 3 на экранах высвечены $u(t)$ и $i(t)$, соответствующие сигналам на входе модели КЛ, т.е. сигналам с первого звена ЦС, так как активными являются верхние первые кнопки.

На рис. 4 на экраны осциллографа высвечены сигналы со всех пяти звеньев, так как активными являются все пять кнопок.

На передней панели расположены элементы управления для ввода значений параметров (R_i, L_i, G_i, C_i) звеньев ЦС, где i – номер звена.

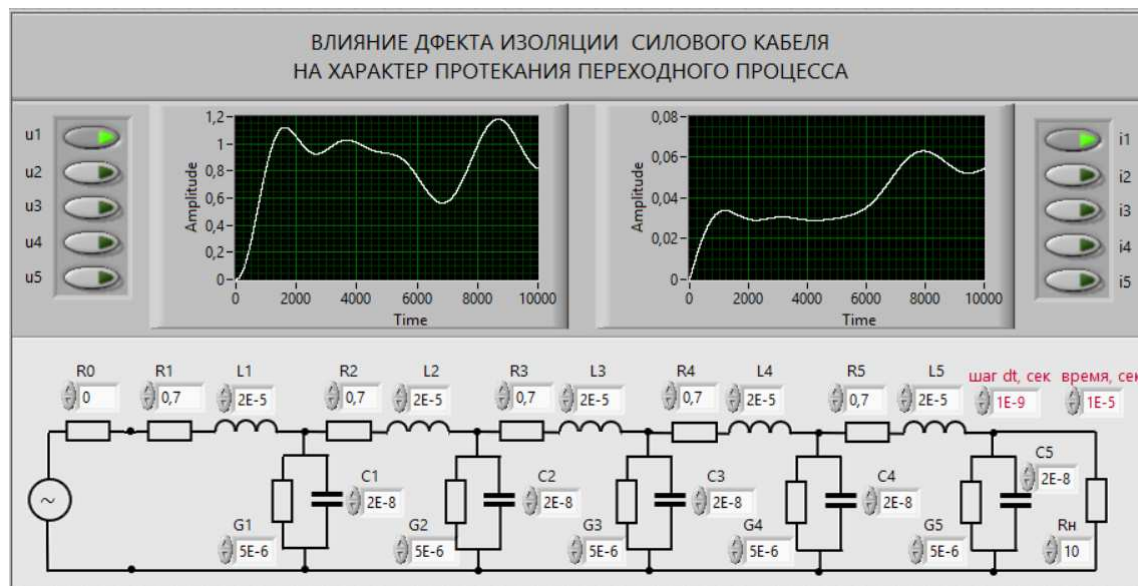


Рисунок 3 – Передняя панель ВП при активном положении верхних (первых) кнопок (на экранах высвечены напряжение $u(t)$ и ток $i(t)$ первого звена ЦС)

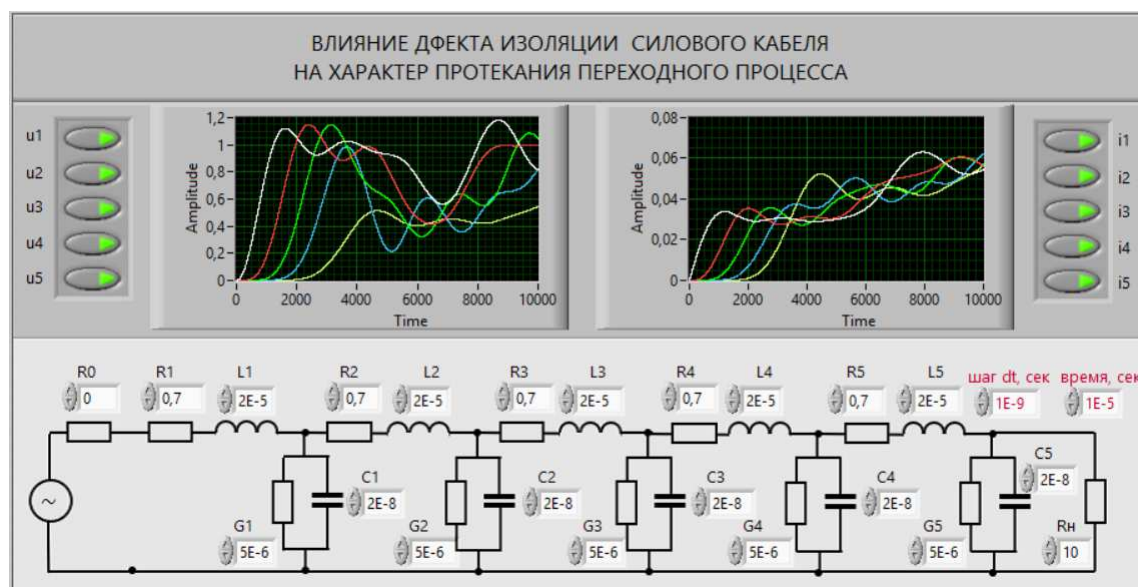


Рисунок 4 – Передняя панель ВП при активном положении всех (пяти) кнопок (на экранах высвечены напряжения и токи всех пяти звеньев ЦС)

Кроме того, на передней панели расположены элементы управления для ввода параметров моделирования, т.е. значение шага dt в сек и продолжительность моделирования T в сек. На передней панели также изображено модель СК в виде цепочной схемы.

Моделью СК на начальном этапе эксплуатации является однородная цепная схема (ОЦС), так как параметры всех звеньев ЦС равны, т.е. отсутствуют локальные дефекты в изоляции СКЛ. При возникновении локального дефекта на каком-то участке ЦС, например, на третьем, параметр этого участка изменяется. Этого касается только тех параметров, которые характеризуют локальные свойства высоковольтной изоляцией СК, т.е. его проводимости G_3 и емкости C_3 .

На рис. 5, а, б показаны соответственно блок-диаграмма ВП и блок-диаграмма третьего подприбора. Функциональные возможности ВП определяются содержанием блок-

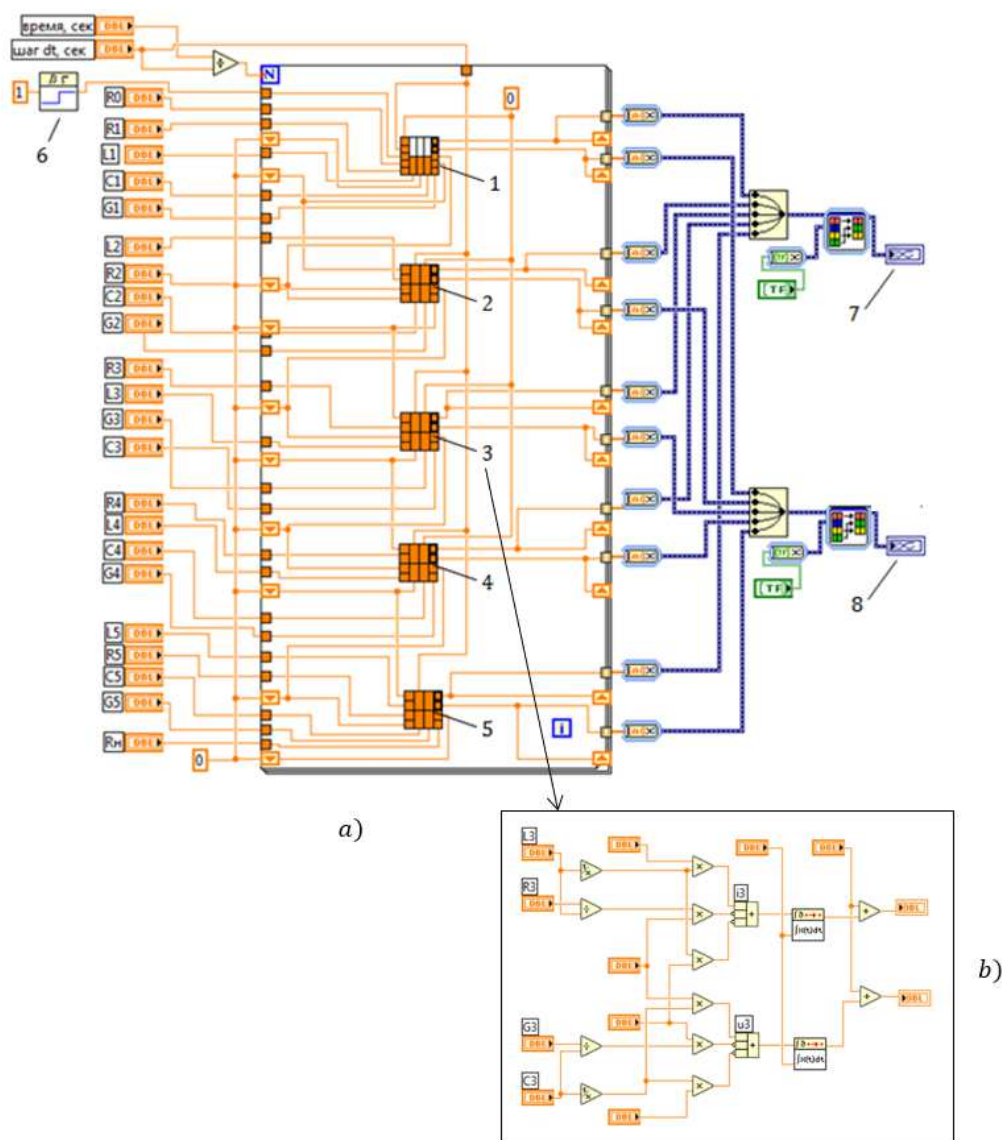


Рисунок 5 – Блок-диаграмма ВП (а) и блок-диаграмма третьего подприбора (б)

диаграмм. Рассматриваемый ВП решает систему дифференциальных уравнений (1), в результате получаем напряжения и токи, соответствующие каждому из пяти звеньев. Подпри-

боры 1, 2, 3, 4, 5 на рис. 5а соответствуют каждой строке системы дифференциальных уравнений (1). Для примера на рис. 5б раскрыто содержание третьего подприбора. На выходе элемента 6 вырабатывается ступенчатый сигнал, соответствующий напряжению заданной амплитуды. Он подается на вход первого звена ЦС. Элементы с номерами 7 и 8 соответствуют осциллографам, где высвечивается ход электромагнитного переходного процесса $u(t)$ и $i(t)$.

Результаты численного эксперимента

Для проведения численного эксперимента с целью изучения степени влияния локальных дефектов в изоляции СКЛ на ход электромагнитных переходных процессов воспользуемся ОЦС из [14], состоящей из пяти звеньев и представляющей условную модель силового кабеля с параметрами $R = 0.7$ Ом, $L = 2 \cdot 10^{-5}$ Гн, $G = 0.5 \cdot 10^{-7}$ См, $C = 2 \cdot 10^{-8}$ Ф.

Так как во всех пяти звеньях приведенные параметры одинаковы, то рассматриваемый случай соответствует силовому кабелю без дефектов на начальной стадии эксплуатации.

Появления локальных дефектов на каком-то участке кабеля будем моделировать изменением параметров изоляции этого участка (G_i, C_i), где i номер участка. При этом будем варьировать значениями i от 1 до 5, тем самым мы будем изучать влияние не только значения параметров изоляции локального дефекта на характер переходного процесса, но и их местоположения.

При варьировании параметров изоляции СК, моделирующих ее старение, будем исходить из того, что диэлектрическая проницаемость и $tg\delta$ слабо влияют на электрическую прочность $E_{пр}$ и не могут служить критерием работоспособности изделия из-за малой чувствительности к старению [17]. Наиболее информативной характеристикой изоляции является величина электрического сопротивления, которая в процессе эксплуатации кабелей может изменяться на несколько порядков. Поэтому мы рассмотрим влияния значения G_i на характер переходного процесса.

Ниже в графической форме показаны зависимости от времени входного напряжения и тока при включении цепной схемы, представляющие модель условного силового кабеля на единичный скачок напряжения.

Заключение

В заключении проанализируем результаты численных экспериментов (рис. 6-11).

На рис. 6 показаны зависимости от времени входного напряжения и тока при включении цепной схемы, представляющие модель реакции условного силового кабеля на единичный скачок напряжения при начальных нулевых условиях и отсутствии локальных дефектов, т.е. цепная схема однородна.

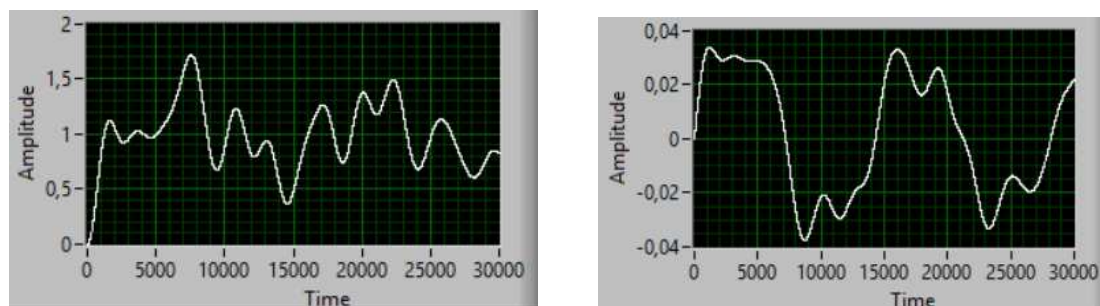


Рисунок. 6 – Напряжение и ток при отсутствии локальных дефектов в изоляции СК

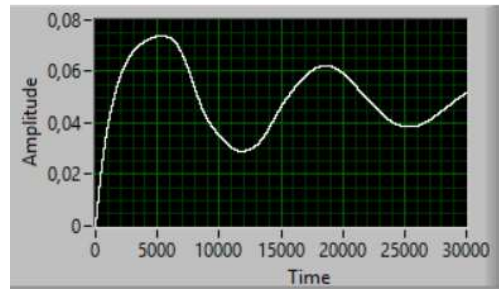
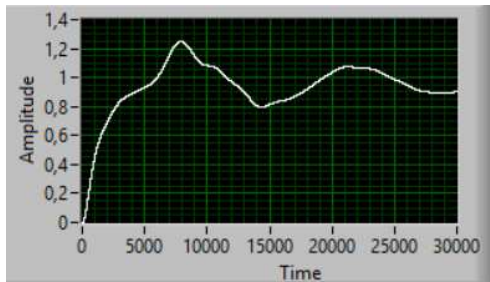


Рисунок 7 – Напряжение и ток при увеличении электрической проводимости изоляции на четыре порядка на первом участке НЦС

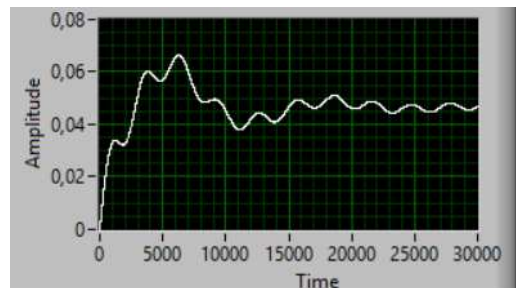
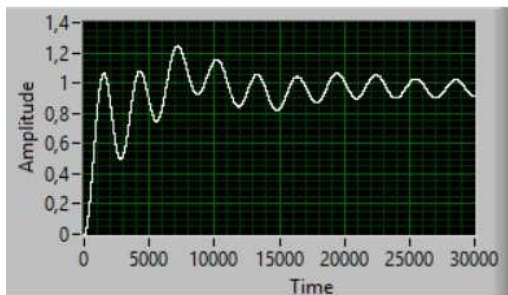


Рисунок 8 – Напряжение и ток при увеличении электрической проводимости изоляции на четыре порядка на втором участке НЦС

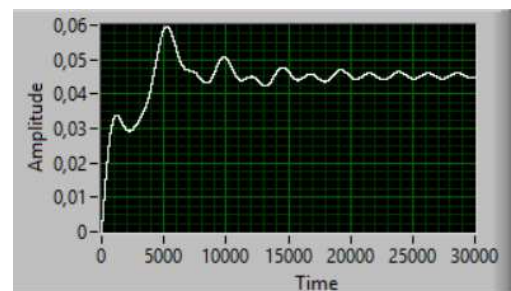
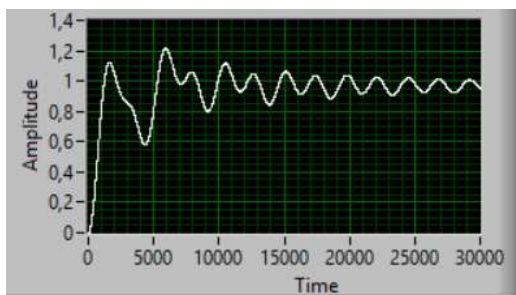


Рисунок 9 – Напряжение и ток при увеличении электрической проводимости изоляции на четыре порядка на третьем участке НЦС

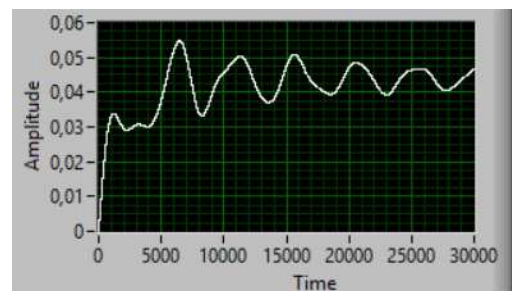
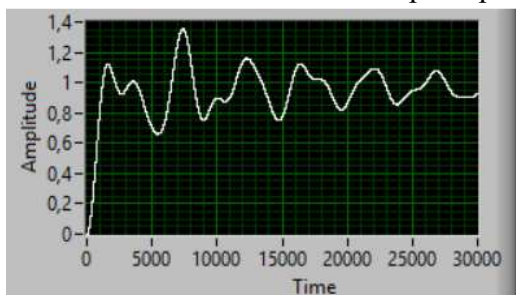


Рисунок 10 – Напряжение и ток при увеличении электрической проводимости изоляции на четыре порядка на четвертом участке НЦС

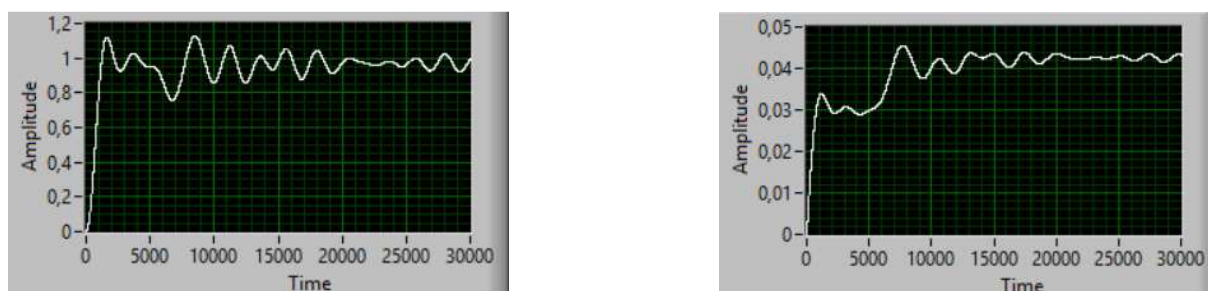


Рисунок 11 – Напряжение и ток при увеличении электрической проводимости изоляции на четыре порядка на пятом участке НЦС

На последующих рисунках рассматриваемые зависимости напряжения и тока соответствуют случаю, когда возникли локальные дефекты, соответственно, в первом и последующих звеньях. Как видно из этих рисунков, приведенные зависимости качественно отличаются друг от друга и от случая, когда в изоляции отсутствовали локальные дефекты. Это и позволяет констатировать факт присутствия локального дефекта в определенном месте по длине кабеля.

В результате можно заключить, что результаты компьютерного моделирования показали справедливость высказанных в работе предположений о возможности определения факта наличия локальных дефектов и их местоположения путем анализа характера протекания электромагнитных переходных процессов.

Литература

1. Кобец, Б.Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. / Б.Б. Ко-бец, И.О. Волкова . — М.: ИАЦ Энергия, 2010. — 208 с.
2. Кобец, Б.Б. Smart Grid как концепция инновационного развития электроэнергетики за рубежом / Б.Б. Кобец, И.О. Волкова, В.Р. Огороков // Энергоэксперт, 2010. – №2. – С. 52 – 58.
3. Подлесный В., Млынчик Т. Диагностика кабельных линий. <https://www.elec.ru/publications/peredacha-raspredelenie-i-nakoplenie-elektroenergi/1540/> (дата обращения: 12.09.2021).
4. Привалов, И.Н. Современные методы и технические средства для испытаний и диагностики силовых кабельных линий номинальным напряжением до 35 кВ включительно // Петербургский энергетический ин-т повышения квал. работ. и спец. (ПЭИПК). – СПб., – 2008. – 104 с.
5. Пономарев Н.В. Анализ методов диагностики состояния силовых высоковольтных кабельных линий. <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-dagnostiki-sostoyaniya-silovyh-vysokovoltnyh-kabelnyh-liniy/viewer> (дата обращения: 14.09.2021).
6. Моделирование в среде Labview: учебное пособие (лабораторный практикум) / авт.-сост.: П.А. Звада, Д.С. Тучина. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2019. – 130 с.
7. Магда Ю. С. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 208 с.

8. Эралиева Г.Ш., Абдыбаева Ж.К., Асан уулу А., Суюнтбекова Н.А. Исследование переходных процессов в неоднородных цепных схемах на основе компьютерного моделирования // Проблемы автоматизации и управления. 2021. № 2 (41). С. 100-108
9. Асанова С.М., Ниязова Г.Н., Сатаркулов К. Моделирование электромагнитных взаимодействий смежных ЛЭП на основе метода переменных состояния // Проблемы автоматизации и управления. – 2015. – № 1 (28). – С. 231-236.
10. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с. с ил.
11. Моделирование в среде Labview: учебное пособие (лабораторный практикум) / авт.-сост.: П.А. Звада, Д.С. Тучина. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2019. – 130с.
12. Магда Ю. С. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 208 с.
13. Бузурманкулова Ч.М. Численное интегрирование дифференциального уравнения перегрева жил токопроводов относительно температуры окружающего мира в среде LabVIEW // Проблемы автоматизации и управления. – 2021. – № 2 (41). – С. 11-17.
14. Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.
15. Щерба А.А., Перетятко Ю.В. Моделирование и анализ электрического поля в полимерной изоляции самонесущих изолированных проводов при наличии в ней объемных и поверхностных дефектов // Техн. електродинаміка. Тем. вип.: Силова електроніка та енергоефективність. – 2007. – Ч. 1. – С. 108–112.
16. Шувалов М.Ю., Ромашкин А.В., Овсиенко В.Л. Анализ дефектов в изоляции силовых высоковольтных кабелей методами видеомикроскопии и микроэксперимента // Электричество. – 2000. – № 5. – С. 49–57.
17. Фризен А.Н., Петров А.В. Свойства изоляции кабелей для питания погруженных электронасосов добычи нефти // Наука и техника. – 2007. – № 4 (305). – С. 44-49.

Рецензенты номера:

д.т.н., проф. Брякин И.В.
д.т.н., проф. Бочкарев И.В.
д.т.н., проф. Лыченко Н.М.
д.т.н., доц. Бакасова А.Б.

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

Научно-технический журнал

Литературный редактор Е.В. Комарова

Компьютерная верстка С.Н. Верзунов

Подписано к печати 01.11.2021 г. Формат 84/108 1/16

Печать офсетная. Объем 11.84 усл. п.л. Тираж 200 экз.

Издательство «ИМА»

720071, Бишкек, проспект Чуй, 265