

EISSN 1694-836X  
ISSN 1694-5050

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ И АВТОМАТИКИ

# ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

№ 1 (43)



БИШКЕК

**2022**

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 № 1 (43)

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.



П 78

Проблемы автоматизации и управления: Научно-технический журнал  
/ Национальная академия наук Кыргызской Республики.–Бишкек: ИМА, 2022.– №1 (43). – 130 с.

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:**

д.т.н., профессор Брякин Иван Васильевич ✉  
Институт машиноведения и автоматизации НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

**ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ:**

к.т.н. Верзун 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 Исмаилович ✉  
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](mailto: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, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

ПЕРЕХОДНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОМ ХАРАКТЕРЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗАГРУЗКИ Эралиева Г.Ш., Кабаев Т., Бузурманкулова Ч. Б., Суйунтбекова Н.	4-12
СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АППАРАТОВ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ Асан уулу А.	13-20
МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АВТОНОМНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ Асанова С.М., Суеркулов С.М., Бакасова А.Б., Сатаркулов К., Асанов М.С.	21-32
ОБЗОР И АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД Касимова А.У., Верзунов С.Н.	33-49
АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ЕЭМП КНЧ-ОНЧ ДИАПАЗОНОВ Брякин И.В., Мамытов Н.Г.	50-60

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ОТКРЫТОМ БУРНОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВОДЫ (НА ОСНОВЕ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ ВОДЫ) Керимкулова Г.К., Пресняков К.А., Аскалиева Г.О.	61-71
О СХОДИМОСТИ ПРИБЛИЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА Керимбеков А., Кабаева З. С., Абдылдаева Э.	72-83

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

ДИАГНОСТИКА РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПНЕВМОНИИ ПО РЕНТГЕНОВСКИМ СНИМКАМ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ Верзунов С.Н.	84-94
ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ Бакасова А.Б., Асан уулу А.	95-103
РЕФЕРЕНСНАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ И СРЕДЫ ВЕБ-СЕРВИСОВ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТОВ OGC Гайдамако В.В.	104-113
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ФИЗИЧЕСКОМ ВОСПИТАНИИ Коробко Ю.В.	115-129

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.039.514.25: 621.314.222.6: 621.22.018

*Т. Кабаев, [tkabaev1947@gmail.ru](mailto:tkabaev1947@gmail.ru)*

*Г.Ш. Эралиева, [eralieva.gulmira@mail.ru](mailto:eralieva.gulmira@mail.ru)*

*Ч.М. Бузурманкулова, [chbuzurmankulova@mail.ru](mailto:chbuzurmankulova@mail.ru)*

*Н.А. Суюнтбекова, [nurasuuntbekova@gmail.com](mailto:nurasuuntbekova@gmail.com)*

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

### ПЕРЕХОДНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОМ ХАРАКТЕРЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗАГРУЗКИ

Разработана имитационная Simulink – модель (ИМ) расчета температуры магнитопровода, обмотки и масла. ИМ позволяет исследовать переходные тепловые процессы в силовых масляных трансформаторах (СМТ). Отмечено, что ИМ позволяет анализировать широкий спектр различных режимов их работы, таких как: нагрев СМТ при включении его на постоянную нагрузку с коэффициентом загрузки, равной единице, при этом начальная температура всех его элементов равна 20°C; стохастический режим, когда коэффициент загрузки изменяется случайно; режим работы с учетом случайности изменения температуры окружающей среды. Отмечено, что возможно моделирование работы СМТ и для таких случаев, например, как холостой режим, режим охлаждения (уменьшения температуры магнитопровода, обмотки и масла) после отключения СМТ от сети. Приведены результаты численного эксперимента.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор; нагрев; тепловой переходный процесс; тепловая модель; температура обмотки, масла, магнитопровода.

#### Введение

Силовые трансформаторы (СТ) в системе электроснабжения являются одними из наиболее дорогостоящих элементов, следственно обеспечивая допустимую работу в критериях, ближайших к номинальным по температуре и износу изоляции. Такой подход считается важной технико-экономической задачей, потому что долгий ненормальный режим работы трансформатора имеет возможность привести или к катастрофическому износу изоляции или к недоиспользованию его мощности.

Длительная работа трансформаторов в ненормальном режиме нормированных перегрузок определяется при допустимом нагреве магнитопровода, обмотки и масла, который находится в зависимости от класса термостойкости применяемой изоляции.

В силовых трансформаторах на данный момент не существует аппарата, который определил бы точную температуру токоведущих частей. Учитывая вышеизложенную информацию, можем определить нагрузку у высоковольтных трансформаторов, оценивая их с помощью математического моделирования при тепловых процессах.

Таким образом, эта модель переходных тепловых процессов повлияет на точную и эффективную работу по всей энергосистеме [1].

#### Данные и методы

Следующая система дифференциальных уравнений описана для тепловых нестационарных процессов в СТ при процессе нагревания (начальные условия нулевые) [2, 3]:

$$\begin{cases} C_1 \cdot \frac{d\vartheta_1}{dt} + A_{1,0} \cdot \vartheta_1 + A_{1,2} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) + A_{1,3} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_3) = P_1; \\ C_2 \cdot \frac{d\vartheta_2}{dt} + A_{2,0} \cdot \vartheta_2 + A_{2,1} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) + A_{2,3} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_3) = P_2; \\ C_3 \cdot \frac{d\vartheta_3}{dt} + A_{3,0} \cdot \vartheta_3 + A_{3,1} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_1) + A_{3,2} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_2) = P_3. \end{cases} \quad (1)$$

В системе уравнений (1) индексы обозначают: 1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – масло; 0 – охлаждающая среда; коэффициенты  $A_{i,k}$  – потери, тепловые проводимости, происходящие при передаче между соответствующими тепловыми телами;  $C_1, C_2, C_3$  – теплоемкости соответствующих тел ( $\text{Вт} \cdot \text{ч}/^\circ\text{C}$ ) ( $C = C_{yd} \cdot G$ ,  $C_{yd}, G$  – соответственно удельная теплоемкость и масса тела, величины справочные);  $\vartheta_1 = (\theta_1 - \theta_0)$ ,  $\vartheta_2 = (\theta_2 - \theta_0)$ ,  $\vartheta_3 = (\theta_3 - \theta_0)$  – высокая температура магнитопровода, обмотки и масла ( $^\circ\text{C}$ );  $P_1, P_2, P_3$  – электрические потери магнитопровода, обмотки и масла ( $\text{Вт}$ ). Так как, учитывая конструктивные особенности СТ, теплообмен между телами и охлаждающей средой отсутствует, то соответствующие тепловые проводимости равны нулю [2]:  $A_{1,0} = A_{1,2} = A_{2,0} = A_{2,1} = 0$ .

Обратные тепловые проводимости дают тепловые сопротивления и обозначаются следующим образом [4]:  $R_1 = 1/A_{1,3} = 1/A_{3,1}$ ;  $R_2 = 1/A_{2,3} = 1/A_{3,2}$ ;  $R_3 = 1/A_{3,0}$ .

Потери в магнитопроводе трансформатора  $P_1$  равны потерям холостого хода  $\Delta P_{xx}$ , потери в обмотке  $P_2$  равны потерям короткого замыкания  $\Delta P_{kz}$ , а потери в масле отсутствуют [2], поэтому:

$$P_1 = \Delta P_{xx}; P_2 = \Delta P_{kz}; P_3 = 0. \quad (2)$$

Потери короткого замыкания  $\Delta P_{kz}$  можно вычислить по формуле, приведенной в [2]:

$$\Delta P_{kz} = \Delta P_{k.nom} \cdot K_z^2, \quad (3)$$

где  $K_z = S/S_{nom}$  – коэффициент загрузки (КоЗаг) трансформатора;  $S_{nom}$  – номинальная мощность трансформатора;  $\Delta P_{k.nom}$  – потери короткого замыкания при номинальной нагрузке.

Тогда с учетом выше введенных обозначений систему уравнений (1) можно переписать в виде [4]:

$$\begin{cases} C_1 \cdot \frac{d\vartheta_1(t)}{dt} + \frac{\vartheta_1(t)}{R_1} - \frac{\vartheta_3(t)}{R_1} = P_1; \\ C_2 \cdot \frac{d\vartheta_2(t)}{dt} + \frac{\vartheta_2(t)}{R_2} - \frac{\vartheta_3(t)}{R_2} = P_2; \\ C_3 \cdot \frac{d\vartheta_3(t)}{dt} + \frac{\vartheta_3(t)}{R_3} - \frac{\vartheta_1(t)}{R_1} + \frac{\vartheta_3(t)}{R_1} - \frac{\vartheta_2(t)}{R_2} + \frac{\vartheta_3(t)}{R_2} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Как отмечено в [4], получение расчетных соотношений непосредственно из системы (4) является достаточно сложной процедурой, в [4] предлагается вести расчет по электрической тепловой схеме замещения, синтезированной на основе системы (4), для частного случая, когда имеет место установившийся тепловой режим и  $K_z = 1$ , а соотношение для определения  $R_1, R_2, R_3$  предлагается получить из системы (4), приняв величины  $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$  постоянными [4]:

$$R_1 = \frac{\vartheta_{s.m}}{\Delta P_{xx}}; R_2 = \frac{\vartheta_{nnt.m}}{\Delta P_{k.nom}}; R_3 = \frac{\vartheta_m}{\Delta P_{xx} + \Delta P_{k.nom}}, \quad (5)$$

где  $\vartheta_{s.m} = \theta_1 - \theta_3$ ;  $\vartheta_{nnt.m} = \theta_2 - \theta_3$  и  $\vartheta_m = \vartheta_3 = \theta_3 - \theta_0$  соответствуют превышению температур магнитопровода над температурой масла; обмотки над температурой масла, превышение температуры масла над температурой охлаждающей среды  $\theta_0$ ;  $\Delta P_{xx}$  и  $\Delta P_{k.nom}$  являются справочными данными, а величины  $\vartheta_{nnt.m}$  и  $\vartheta_m$  устанавливаются диаграммой распределения температур в трансформаторе по высоте бака, приведенной в [2, 3, 5, 6]. Величину  $\vartheta_{s.m}$  считают равной  $25^\circ\text{C}$  [2, 3]. Эта диаграмма является результатом

исследования большого числа трансформаторов по методу кривых охлаждения. Согласно вышесказанному методу, после установления температуры трансформатор выключают и измеряют его среднее значение сопротивления обмотки, полученные результаты измерений экстраполируют в область рабочих температур. Следовательно, в сопротивлениях  $R_1, R_2, R_3$  учтены косвенно процессы теплопередачи и конвекции [4].

В существующих алгоритмах расчета нагрузочной способности силовых трансформаторов, которые разработаны на основе упрощенных тепловых моделей, не учитывается, что коэффициент загрузки силовых трансформаторов и температура окружающей среды (воздуха) изменяются по стохастическому закону.

**Постановка задачи**

Разработка компьютерной модели в среде Simulink на основе системы дифференциальных уравнений, адекватно описывающих нестационарные тепловые режимы работы силовых трансформаторов, позволяющих исследовать закономерности изменения температуры масла в зависимости от температуры обмоток и магнитопровода при стохастическом изменении загрузки трансформатора и температуры окружающей среды.

**Решение задачи**

Следуя работе [7], построим компьютерный аналог (структурную схему) выражения (4) в среде Simulink, который позволяет исследовать характер изменения основных тепловых параметров СМТ при стохастическом изменении КоЗаг трансформатора и температуры окружающей среды (воздуха)  $\theta_0$ .

Для удобства дальнейших преобразований введем в системе (4) следующие обозначения:

$$\vartheta_1(t) \rightarrow x_1; \frac{d\vartheta_1(t)}{dt} \rightarrow \dot{x}_1; \vartheta_2(t) \rightarrow x_2; \frac{d\vartheta_2(t)}{dt} \rightarrow \dot{x}_2; \vartheta_3(t) \rightarrow x_3; \frac{d\vartheta_3(t)}{dt} \rightarrow \dot{x}_3.$$

В результате получим:

$$\begin{cases} C_1 \cdot \dot{x}_1 + \frac{1}{R_1} x_1 - \frac{1}{R_1} x_3 = P_1; \\ C_2 \cdot \dot{x}_2 + \frac{1}{R_2} x_2 - \frac{1}{R_2} x_3 = P_2; \\ C_3 \cdot \dot{x}_3 + \frac{1}{R_3} x_3 - \frac{1}{R_1} x_1 + \frac{1}{R_1} x_3 - \frac{1}{R_2} x_2 + \frac{1}{R_2} x_3 = 0. \end{cases}$$

После дальнейших преобразований эта система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} R_1 C_1 \cdot \dot{x}_1 + x_1 - x_3 = R_1 P_1; \\ R_2 C_2 \cdot \dot{x}_2 + x_2 - x_3 = R_2 P_2; \\ R_3 C_3 \cdot \dot{x}_3 + x_3 - \frac{R_3}{R_1} \cdot x_1 - \frac{R_3}{R_2} x_2 + \left( \frac{R_3}{R_1} + \frac{R_3}{R_2} \right) \cdot x_3 = 0. \end{cases} \quad (6, 7, 8)$$

Ниже, используя совместно уравнения (6), (7), получены выражения, в одном из которых содержится только  $x_1$ , а в другом  $x_2$ . Решение этих уравнений относительно старших производных  $\ddot{x}_1$  и  $\ddot{x}_2$  имеет вид:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 = & - \left( \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_3 C_3} + \frac{1}{R_1 C_3} + \frac{1}{R_2 C_3} + \frac{1}{R_2 C_2} \right) \cdot \dot{x}_1 - \\ & - \left( \frac{1}{R_1 R_3 C_1 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} + \frac{1}{R_2 R_3 C_2 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_2 C_3} \right) \cdot \dot{x}_1 - \\ & - \frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3} \cdot x_1 + \frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3} \cdot R_3 \Delta P_{k.nom} K_z^2 + \frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3} \cdot (R_1 + R_3) \Delta P_{xx}; \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}_2 = & - \left( \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_3 C_3} + \frac{1}{R_1 C_3} + \frac{1}{R_2 C_3} + \frac{1}{R_2 C_2} \right) \cdot \ddot{x}_2 - \\ & - \left( \frac{1}{R_1 R_3 C_1 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} + \frac{1}{R_2 R_3 C_2 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_2 C_3} \right) \cdot \dot{x}_2 - \frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3} x_2 \\ & + \frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3} \cdot R_3 \Delta P_{xx} + \frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3} \cdot (R_2 + R_3) \Delta P_{k.nom} K_Z^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Полученные уравнения описывают тепловые переходные процессы соответственно в магнитопроводе (9) и обмотке СМТ (10). Тепловые переходные процессы в масле определяются уравнением (8). Решив его относительно  $\dot{x}_3$ , получим:

$$\dot{x}_3 = - \left( \frac{1}{R_3 C_3} + \frac{1}{R_1 C_3} + \frac{1}{R_2 C_3} \right) \cdot x_3 + \frac{1}{R_1 C_3} \cdot x_1 + \frac{1}{R_2 C_3} \cdot x_2. \quad (11)$$

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_3 C_3} + \frac{1}{R_1 C_3} + \frac{1}{R_2 C_3} + \frac{1}{R_2 C_2}; \\ K_2 &= \frac{1}{R_1 R_3 C_1 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} + \frac{1}{R_2 R_3 C_2 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_2 C_3}; \\ K_3 &= \frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3}, \quad K_4 = \frac{1}{R_3 C_3} + \frac{1}{R_1 C_3} + \frac{1}{R_2 C_3} \end{aligned}$$

С учетом этих обозначений выражения (9), (10), (11) примут следующий вид:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = -K_1 \cdot \ddot{x}_1 - K_2 \cdot \dot{x}_1 - K_3 \cdot x_1 + K_3 \cdot R_3 \Delta P_{k.nom} K_Z^2 + K_3 \cdot (R_1 + R_3) \Delta P_{xx}; \\ \ddot{x}_2 = -K_1 \cdot \ddot{x}_2 - K_2 \cdot \dot{x}_2 - K_3 \cdot x_2 + K_3 \cdot R_3 \Delta P_{xx} + K_3 \cdot (R_1 + R_3) \Delta P_{k.nom} K_Z^2; \\ \dot{x}_3 = -K_4 \cdot x_3 + \frac{1}{R_1 C_3} \cdot x_1 + \frac{1}{R_2 C_3} \cdot x_2. \end{cases} \quad (12)$$

Разработанная структурная схема (СХ) моделей (рис.1), соответствующая системе (12), построена по известной технологии [8]. СХ позволяет имитировать работу СМТ в различных режимах.

При анализе результатов численного эксперимента, когда будут сопоставляться текущие значения температур магнитопровода, обмотки и масла с их критическими значениями, будем ориентироваться на [4], согласно которой температуры наиболее нагретых точек (ННТ) обмотки, масла и магнитопровода не должны превышать:

- 160 °С для обмотки (по ГОСТ для всех высоковольтных трансформаторов, а согласно руководству МЭК, это значение равно 140 °С);
- 115 °С для масла по ГОСТ;
- 180 °С для магнитопровода по рекомендациям МЭК.

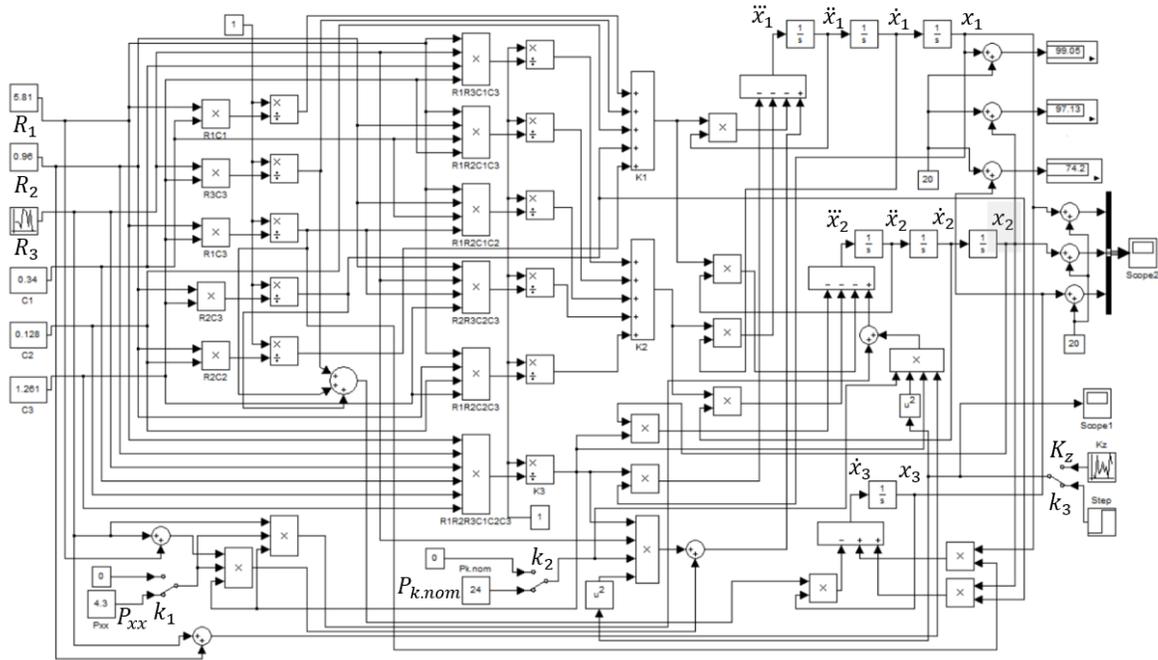


Рисунок 1 – Структурная схема моделей, описывающих процессы изменения температуры магнитопровода –  $\theta_1$ , обмотки –  $\theta_2$  и масла –  $\theta_3$  при стохастическом законе изменении КоЗаг трансформатора и температуры окружающей среды  $\theta_0$

Остановимся на моделировании тепловых переходных процессов трансформатора типа ТМ – 2500. Численные значения параметров  $\Delta P_{xx}$ ,  $\Delta P_{к.ном}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  рассматриваемого СМТ взяты из табл.1 [4].

Таблица 1–Данные тепловых сопротивлений и теплоемкостей трансформаторов 6/10/0,4 кВ

Параметр	Тип трансформатора					
	ТМ - 250	ТМ - 400	ТМ - 630	ТМ - 1000	ТМ - 1600	ТМ - 2500
$\Delta P_{xx}$ , кВт	0,82	1,05	1,56	2,4	3,0	4,3
$\Delta P_{к.ном}$ , кВт	3,7	5,5	7,6	12,0	18,0	24,0
$G_c$ , кг	415	650	900	1350	1950	2650
$G_o$ , кг	124	148	226	290	460	500
$G_m$ , кг	340	500	770	1225	1465	2270
$R_1$ , °C/кВт	30,49	23,81	16,03	10,42	8,33	5,81
$R_2$ , °C/кВт	6,21	4,18	3,03	1,92	1,28	0,96
$R_3$ , °C/кВт	12,17	8,4	6,0	3,82	2,62	1,94
$C_1$ , кВт · ч/°C	0,0533	0,0833	0,1155	0,1744	0,25	0,34
$C_2$ , кВт · ч/°C	0,0319	0,0381	0,0581	0,0744	0,118	0,128
$C_3$ , кВт · ч/°C	0,188	0,277	0,428	0,681	0,814	1,261

### Результаты численных экспериментов

**Режим нагрева СМТ при включении его на постоянную нагрузку с  $K_z = 1$ , температура всех его элементов равна 20 °C**

Моделирование режима работы СМТ при  $K_z = 1$  реализуется следующим образом. Ключ  $k_3$  (рис.1) должен занимать нижнее положение. Изменение положения ключа осуществляется с помощью компьютерной мыши.

При этом закон изменения  $k_3$  определяется блоком (Step). Этот блок на своем выходе генерирует постоянный сигнал. Начало формирования сигнала и его значение задается перед началом моделирования. Эти параметры устанавливаются с помощью диалогового окна блока. Продолжительность моделирования установлена равной 20 единицам машинного времени.

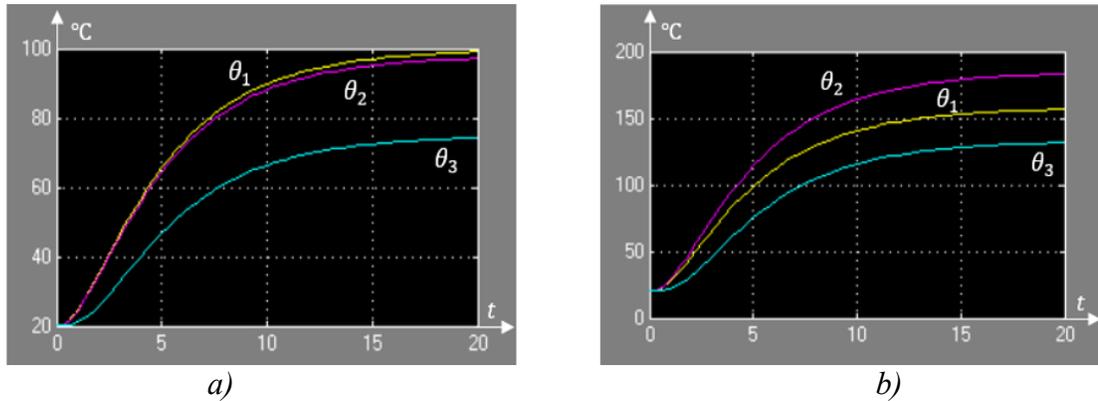


Рисунок – 2. Графики зависимостей температур  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  от продолжительности моделирования соответственно магнитопровода, обмотки и масла ( $^{\circ}\text{C}$ )

а) при  $K_z = 1$ ; и б) при  $K_z = 1,5$

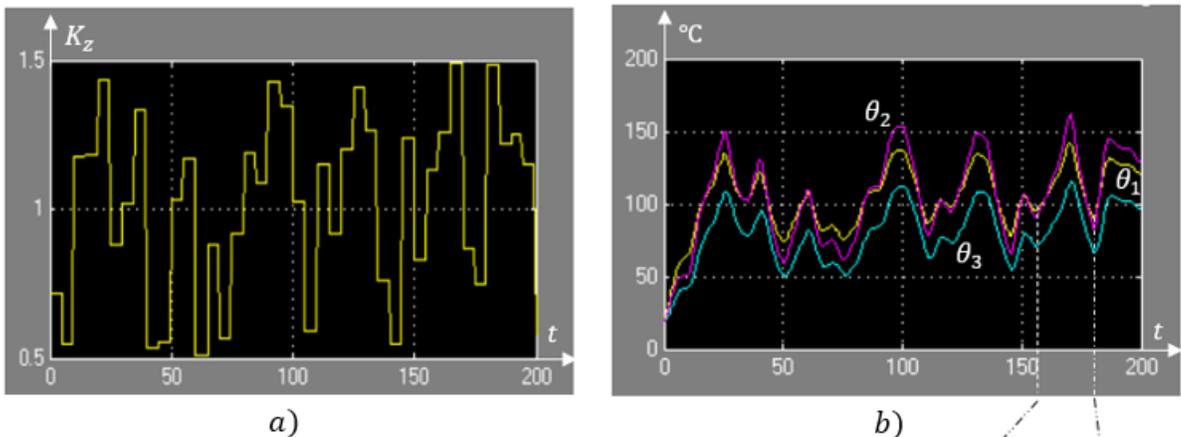
На рис.2, а) показаны графики зависимостей температур  $\theta_1 = (x_1 + 20) ^{\circ}\text{C}$ ,  $\theta_2 = (x_2 + 20) ^{\circ}\text{C}$ ,  $\theta_3 = (x_3 + 20) ^{\circ}\text{C}$  соответственно магнитопровода, обмотки и масла при  $K_z = 1$ . По завершении моделирования температура магнитопровода, обмотки, масла, соответственно, равна  $99,05 ^{\circ}\text{C}$ ,  $97,13 ^{\circ}\text{C}$ ,  $74,20 ^{\circ}\text{C}$ . Следовательно, рассмотренный режим работы СМТ является допустимым. На рис.2, б) показан результат повторного численного эксперимента (ЧЭ) при  $K_z = 1,5$ . График показывает, что по завершении процесса моделирования температуры элементов СМТ составляют соответственно: магнитопровода –  $156,6 ^{\circ}\text{C}$ ; обмотки  $183,2 ^{\circ}\text{C}$  и масла  $131,7 ^{\circ}\text{C}$ . Следовательно, такой режим работы СМТ не приемлем, так как температура обмотки и масла превысили их максимально допустимые значения.

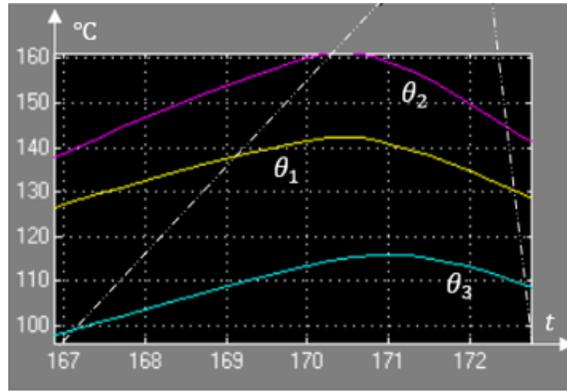
Повторяя такой ЧЭ при различных значениях  $K_z$  многократно, можно установить, что максимально допустимое значение  $K_z=1,28$ . При такой нагрузке температура обмотки соответствует  $141 ^{\circ}\text{C}$ , масла  $103,5 ^{\circ}\text{C}$ , а температура магнитопровода явно ниже допустимого значения  $128,5 ^{\circ}\text{C}$ .

### 1. Стохастический режим (коэффициент загрузки СМТ изменяется случайно)

Моделирование стохастического режима работы СМТ, когда значение  $K_z$  изменяется случайно в заданном интервале его значений, а температура окружающей среды  $\theta_0 = 20 ^{\circ}\text{C}$  фиксирована, реализуется следующим образом.

Ключ  $k_3$  (рис.1) должен занимать верхнее положение. В этом случае стохастический закон изменения  $K_z$  (рис.3, а)) определяется блоком Uniform Random Number (URN).



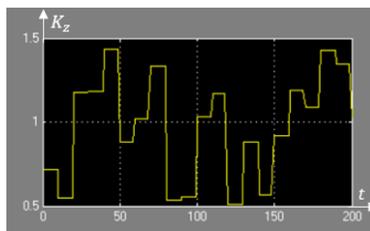


с)

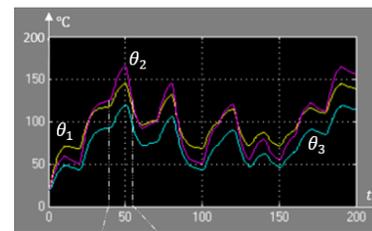
Рисунок 3 – Графики зависимостей: а) – коэффициента загрузки  $K_z \Delta t = 5$ ; б) - температур  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ , соответственно магнитопровода, обмотки и масла ( $^{\circ}\text{C}$ ) при  $(K_z)_{max} = 1,5, (K_z)_{min} = 0,5$ ; в) – развёрнутый график тех же зависимостей в интервале времени (167 – 173)

Этот блок генерирует равномерно распределенные случайные числа по интервалу времени, который задается перед началом моделирования. Числовые параметры этого блока такие, как максимальное и минимальное значения случайных чисел, соответствующие максимальному и минимальному значениям  $K_z$ , задаются диалоговым окном.

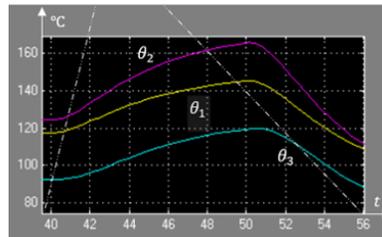
Из рис. 3 в) видно, что при принятых параметрах моделирования максимальная температура обмотки принимает в течение времени, длительностью в 1 единицу машинного времени (емв),  $160^{\circ}\text{C}$ , что допустимо по ГОСТ, а температура масла и магнитопровода соответственно равны  $115^{\circ}\text{C}$  и  $142^{\circ}\text{C}$ , что также допустимо. Однако режим работы СМТ недопустим уже при  $\Delta t = 10$  емв ( $\Delta t$  интервал времени, в течение которого  $K_z$  неизменен), так как температуры обмотки и масла превышают максимально допустимые значения, например, температура обмотки равна  $166^{\circ}\text{C}$ , а масла  $120^{\circ}\text{C}$  (рис.6, б)).



а)



б)



с)

Рисунок 4 – Графики зависимостей: а) – коэффициента загрузки  $K_z \Delta t = 10$ ; б) – температур  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ , соответственно магнитопровода, обмотки и масла ( $^{\circ}\text{C}$ ) при  $(K_z)_{max} = 1,5, (K_z)_{min} = 0,5$ ; в) – развёрнутый график тех же зависимостей в интервале времени (40 – 56)

Отметим, что, кроме рассмотренных режимов работы, имитационная модель в среде Simulink позволяет в заданном интервале времени имитировать и следующие режимы его работы.

## 2. Режим работы СТ с изменением климатических условий окружающей среды

Резкое изменение температурного режима объясняется тем, что в числителе формулы (5) расчета  $R_3$  содержится температура окружающей среды  $\theta_0$ . Случайное изменение этой величины приводит к случайности значения сопротивления  $R_3$ . Поэтому в структурной схеме (рис.1) значение  $R_3$  представлено блоком Simulink, на выходе которого генерируется случайное число, подчиняющееся нормальному закону (Random Number). Выбор такого закона обоснован тем, что, согласно статистическим наблюдениям, температура атмосферы подчиняется этому закону. Параметры блока устанавливаются с помощью его диалогового окна. Из табл. 1. выберем параметры, соответствующие  $R_3 = 1,94 \text{ }^\circ\text{C}/\text{кВт}$ .

В качестве примера рассмотрим режим нагрева СМТ при включении его на постоянную нагрузку с  $K_z = 1,2$ , при этом температура окружающей среды изменяется случайно со средним значением  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  и дисперсией  $0,01(\text{ }^\circ\text{C})^2$  (рис.5).

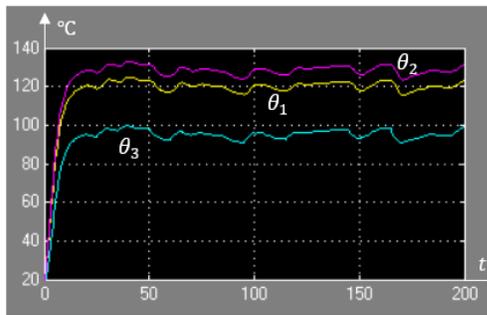


Рисунок 5 – Графики зависимостей: температур  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ , соответственно магнитопровода, обмотки и масла ( $^\circ\text{C}$ ) при постоянной нагрузке СМТ с  $K_z = 1,2$ , и случайном изменении температуры окружающей среды

## 3. Холостой режим работы СМТ

Для организации такого режима необходимо ключ  $k_1$  перевести в нижнее положение, а  $k_2$  – в верхнее.

4. **Режим охлаждения** (уменьшения температуры перегрева магнитопровода, обмотки и масла) после отключения СМТ от сети (в интеграторах устанавливаются текущие значения температур магнитопровода, обмотки и масла, а положения ключей  $k_1, k_2$  верхние).

Температуры магнитопровода, обмотки и масла перед отключением СМТ от сети соответственно равны  $190 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $160 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $140 \text{ }^\circ\text{C}$ .

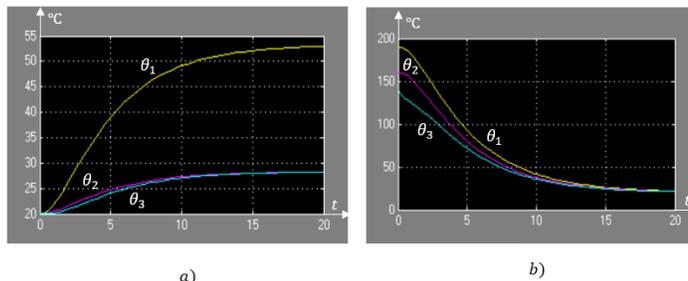


Рисунок 6 – Графики зависимостей температур  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  соответственно магнитопровода, обмотки и масла ( $^\circ\text{C}$ ) от продолжительности моделирования, а) – при холостом режиме работы СМТ; б) – в режиме его остывания

### **Заключение**

Если коэффициент загрузки не изменяется, тогда можем применить упрощенную тепловую модель, которую применяют на сегодняшний день для расчета ННТ обмотки трансформаторов. В реальности он меняется случайным образом, кроме того, температура окружающей среды также случайна.

Разработанная компьютерная модель (структурная схема рис.1), описывающая переходные тепловые процессы в СМТ, имеет более широкие возможности и дает нам эффективные данные, чем с существующими методами при расчете ННТ обмотки, так как определяется на численном решении дифференциальных уравнений теплопереноса при произвольном изменении во времени коэффициента загрузки и температуры окружающей среды.

Широкие возможности разработанной компьютерной (Simulink) модели объясняются тем, что при необходимости, по мере ввода в нее новых блоков, можно быстро менять математическое описание модели, более приближая его к реальности.

### **Литература**

1. Рассальский А.Н., Лучко А.Р., Конограй С.П., Гук А.А. Применение тепловой модели силового автотрансформатора для расчета нагрева его элементов в режиме эксплуатации // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": Сб. науч. тр. Темат. вып.: Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2009. – № 7. – С. 133–138.
2. Боднар В.В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1980.
4. Зализный Д.И. Использование тепловой модели для теоретических исследований тепловых процессов в масляных трансформаторах 10/0,4 кВ // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2001. – № 3–4. – С. 51 – 60.
5. Стандарт МЭК 354. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов (англ., фр.). – 2-е издание, 1991.
6. ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1987.
7. Сатаркулов К., Калматов У. А., Суюнтбекова Н. А. Анализ процесса охлаждения силового трансформатора аналитическим и численным методами // Проблемы автоматизации и управления. – 2018. – № 2 (35). – С. 42 – 50.
8. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс. - СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2005. – 512 с.: ил.

УДК: 621.311.6:621.791.76/.79

Асан уулу Аскат [asanaskat@gmail.com](mailto:asanaskat@gmail.com)

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,  
Кыргызстан, Бишкек, проспект Ч. Айтматова, 66

## СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АППАРАТОВ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

В статье рассмотрен метод управления трехфазным и однофазным матричным преобразователем с шестью ключами, позволяющий формировать выходное напряжение прямоугольной формы частотой 50 Гц [6].

Предложено схемное решение и способ управления матричным преобразователем с пятью ключами, что позволяет при генерации выходного напряжения, синхронизированного с сетью, получить коэффициент мощности ИП, близкий к единице.

**Ключевые слова:** аппарат для контактной сварки, источник питания, матричный преобразователь, коэффициент мощности, электромагнитная совместимость.

**Введение.** В работе исследованы проблемы обеспечения электромагнитной совместимости источников питания однофазных сварочных аппаратов с трехфазной питающей сетью. Были рассмотрены два основных направления: применение активных фильтрокомпенсирующих устройств (АФКУ) и разработка источников питания (ИП) с коррекцией коэффициента мощности (ККМ). Использование АФКУ позволяет использовать имеющееся сварное оборудование, но высокая стоимость ограничивает его широкое применение. ИП с ККМ предполагает применение преобразователей либо со звеном постоянного тока, либо с прямыми матричными преобразователями, ибо главным условием к ИП для сварочных аппаратов является возможность генерирования выходного напряжения заданной формы, амплитуды и частоты [6].

Источники питания (ИП) аппаратов для контактной сварки являются мощными нелинейными потребителями электрической сети. В большинстве из них применяются схемы управления тиристорами. Кроме того, подобные ИП, будучи преимущественно однофазными, при их подключении к трехфазной сети (особенно при включении и одновременной работе некоторых ИП сварочных агрегатов в разных фазах) оказывают на нее отрицательное влияние. Это проявляется в росте коэффициентов асимметрии и несинусоидальности напряжения [6]. Падение качества питающего напряжения в свою очередь влияет на качество сварки, притом особенно значимым приходит отклонение напряжения, которое при превышении 15% приводит к 100%-му браку (для коррозионностойких сталей 100% брака считается вызванным отклонением напряжения на значение более 10%) [6]. Таким образом, решение задачи обеспечения электромагнитной совместимости сварного оборудования с электросетью представляется актуальной задачей.

Решение указанной проблемы осуществляется двумя вариантами:

- применение дополнительных активных фильтров компенсирующих устройств (АФКУ) [6]
- разработка и применение ИП с коррекцией коэффициента мощности (ККМ) [5].

Осуществление первоначального варианта позволяет гарантировать требуемый коэффициент мощности (КМ) «источник сварного тока – АФКУ», уменьшит потери мощности в электрической сети, гарантирует симметричную нагрузку при работе однофазного источника питания в трехфазной сети. Плюсом подобного расклада представляется сохранение имеющегося сварного ИП в технологическом процессе без каких-нибудь доработок. Главным изъяном первого варианта представляется его невысокая рентабельность, так как цена АФКУ соизмерима с ценой самого ИП [6].

**Цель исследования** направлена в основном на снижение стоимости таких ИП, заключающаяся в разработке эффективного источника питания для аппарата контактной сварки (АКС), обеспечивающего высокое качество процесса сварки и электромагнитную совместимость с электросетью.

**Задача заключается** в доработке ИП в связи с развитием силовой электроники и появлением мощных и быстродействующих силовых выключателей, позволяющих коммутировать большие нагрузки. В работах [6-8] рассматривались схемные решения, направленные на обновление ИП за счет применения тиристорных преобразователей трехфазного напряжения в однофазные, позволяющие обеспечить симметричную нагрузку. Основным недостатком этих схем является высокий коэффициент потребления несинусоидальных токов (до 80–90%) и необходимость применения низкочастотного трансформатора, что связано с понижением частоты выходного напряжения, генерируемого тиристорным преобразователем.

На сегодняшний день наиболее эффективной является разработка ИП из биполярных транзисторов с изолированным затвором (БТИЗ), которые созданы в основном на основе преобразователей мощности с промежуточным звеном постоянного тока (выпрямитель, промежуточное звено постоянного тока, инвертор). Включение подобных преобразователей к электросети выполняется посредством входного трехфазного LC-фильтра, изолирующего сеть от составляющих модулирующего тока, генерируемого преобразователем [6]. При симметричной системе сетевых напряжений применение неконтролируемых выпрямителей (например, шестипульсный) обеспечивает потребление симметричных токов от сети [8]. Но при несимметричном сетевом напряжении симметрия потребляемых токов тоже нарушается. Кроме этого, спектральный состав токов, потребляемых шестипульсным выпрямителем, не гарантирует его электромагнитную совместимость с сетью без установки АФКУ в соответствии с нормами, установленными ГОСТ 13109–97. Топологии инверторов, которые наиболее часто используются для таких ИП, – мостовая, полумостовая и двухтактная, поскольку дают обеспечение полного отсутствия постоянного составляющего магнитного потока в трансформаторах. Двухтактные и мостовые инверторы генерируют на выходе преобразователя биполярное напряжение, максимальное значение которого равно напряжению промежуточного контура. Недостатком двухтактного инвертора является необходимость использования переключателей, способных выдерживать удвоенное напряжение промежуточного контура. К недостаткам мостового инвертора можно отнести увеличенное количество силовых переключателей (четыре у моста против двух у двухтактных). Полумостовой инвертор, выполненный с двумя ключами, производит выходное напряжение, наибольшее значение которого равно половине напряжения промежуточного контура, что является его недостатком [7].

Установка корректора коэффициента мощности на входе преобразователя позволяет обеспечить потребление синусоидальных токов [7], однако несколько снижает технико-экономические характеристики источника питания в связи с увеличением количества управляемых переключателей мощности. На базе преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока достаточно эффективны, но их широкое применение сдерживается ценой. Кроме этого, есть проблема обеспечения надежности накопителя энергии в цепи постоянного тока, а также надобность введения специальных схем лимитирования тока заряда конденсаторов при подключении источника питания к сети [6].

**Постановка задачи.** Рассматривается сварочный трансформатор, преобразователь, установленный в первичной цепи трансформатора, и входной фильтр, включенный между преобразователем и сетью (рисунок 1).

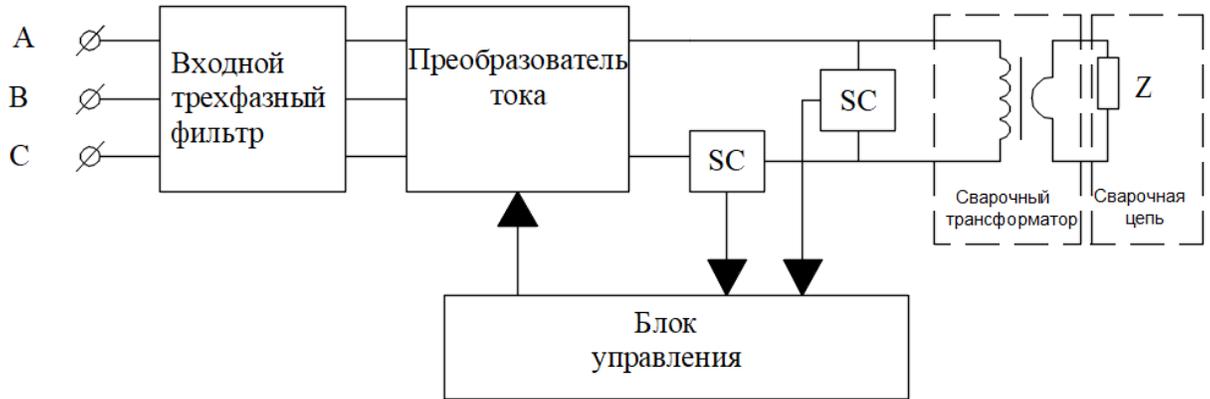


Рисунок 1 – Принципиальная блок-схема подключения сварочного аппарата к сети

Входными сигналами для управления преобразователем служат ток и напряжение, измеряемые датчиками (SC, SV) [6]. В качестве преобразователя тока предлагается использовать прямой матричный преобразователь (МП), особенностью которого является отсутствие промежуточного звена постоянного тока (конденсатора большой емкости), что значительно увеличивает технико-экономические показатели преобразователя. Трехфазный и однофазный МП состоят из шести двухнаправленных переключателей, каждый из которых включает одну из фаз сети непосредственно на нагрузку (рисунок 2). Выполнен в виде двух транзисторов с обратными диодами, имеющих встречно-последовательное соединение, а управляющие электроды БТИЗ подключены к блоку управления (БУ). Как правило, для того чтобы минимизировать потери мощности в электрической сети, при подключении к нему нагрузки можно добиться, обеспечив симметричность между потребляемыми токами и напряжениями [6]. Таким образом, МП должен моделировать симметричную активную нагрузку.

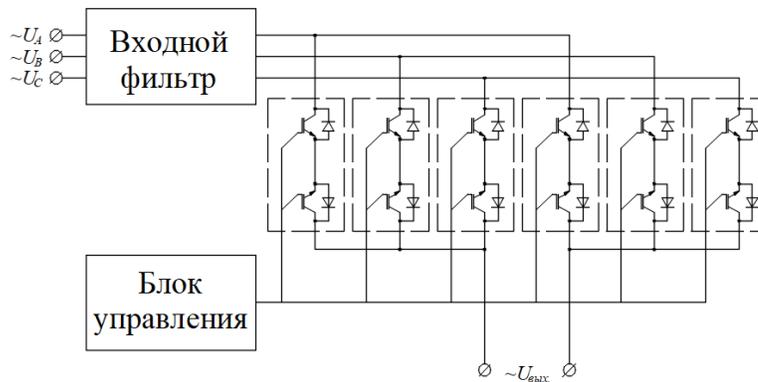


Рисунок 2 – Упрощенная электрическая схема матричного преобразователя

**Решение.** Мгновенная активная мощность трехфазной сети определяется как сумма мгновенных активных мощностей всех трех фаз [8]:

$$p(t) = p_A(t) + p_B(t) + p_C(t) = (u_A(t)^2) / R + (u_B(t)^2) / R + (u_C(t)^2) / R, \quad (1)$$

где  $p_A(t) = (u_A(t)^2) / R$  – мгновенная мощность фазы А; где  $p_B(t) = (u_B(t)^2) / R$  – мгновенная мощность фазы В; где  $p_C(t) = (u_C(t)^2) / R$  – мгновенная мощность фазы С;  $R$  – смоделированная активная нагрузка, Ом;  $u_A(t), u_B(t), u_C(t)$  – мгновенные фазные напряжения сети, В.

Для симметричных напряжений и нагрузки мгновенная мощность является постоянной величиной [6]. Но из-за отсутствия энергетического конденсатора сам МП не является потребителем активной мощности (без учета потерь мощности в силовых

переключателях, которым пока можно пренебречь). Следует из этого, чтобы обеспечить симметричное потребление токов, МП всегда должен потреблять постоянную активную мощность [6]:

$$P = U(t)I(t) = const, \quad (2)$$

где  $U(t)$  – выходное напряжение МП;  $I(t)$  – выходной ток МП.

Если пренебречь воздействием индуктивности сварной цепи на выходной ток преобразователя, то с возможной погрешностью можно предположить, что симметричное потребление токов МП возможно при генерации постоянного напряжения на его выходе. Но для постоянной составляющей тока, проходящего посредством первичной обмотки сварного трансформатора, это приведет к увеличению намагниченности и порядочным потерям мощности [6].

Этого можно избежать, изменив полярность выходного напряжения МП в соответствии с выражением:

$$\int_0^{T_{\text{вых}}} U(t)dt = 0, \quad (3)$$

где  $T_{\text{вых}}$  – период выходного напряжения МП, с.

При асимметричной системе сетевых напряжений мгновенная активная мощность трехфазной сети, определяемая выражением (1), не является постоянной величиной, тогда управление преобразователем может осуществляться из условия усредненной за период заданной активной мощности потребляемой мощности сети, которое регулируется изменением имитирующего активного сопротивления  $R$ . Здесь имитирующее активное сопротивление не должно изменяться в течение периода сети, чтобы не генерировать низкочастотные гармоники.

Рассмотрим симметричную систему напряжений и, согласно сделанному выше предположению, осуществим генерацию прямоугольного напряжения с частотой 50 Гц на выходе МП. Примем начальный фазовый сдвиг фазы напряжения  $A$ , равный нулю. Условно поделим период сети на шесть секторов: первому и четвертому сектору соответствует наибольшее абсолютное значение мгновенного напряжения фазы  $B$  (первое при отрицательном напряжении фазы  $B$ , четвертое – при отрицательном напряжении фазы  $B$ , положительной), второй и пятой – фазы  $A$  (вторая при положительном напряжении фазы  $A$ , пятая – отрицательной), третья и шестая – фазе  $C$  (третья – при отрицательном напряжении фазы  $C$ , шестой – на плюсе).

Рабочие циклы переключателей  $Q1 - Q6$  управляющих импульсов можно рассчитать по следующим выражениям:

$$D_1 = \frac{u_A(t)}{RI(t)}; \quad D_2 = -\frac{u_B(t)}{RI(t)}; \quad D_3 = -\frac{u_C(t)}{RI(t)}; \\ D_4 = -D_1; \quad D_5 = -D_2; \quad D_6 = -D_3; \quad (4)$$

**Полученные результаты.** Выбор необходимой пары переключателей для положительной полярности выходного напряжения происходит в блоке управления в соответствии с таблицей 1. Единичный рабочий цикл импульса в таблице означает, что в данном секторе переключатель включен постоянно. Для формирования выходного напряжения отрицательной полярности сигналы управления переключателями  $Q1 - Q3$  и  $Q4 - Q6$  меняются местами друг с другом (таблица 2).

Использование выходного напряжения с частотой 50 Гц дает еще один эффект: при синхронизации выходного напряжения с одним из сетевых напряжений (например, фазой  $A$ ) количество силовых переключателей преобразователя может быть уменьшено до пяти (рисунок 3). Рабочие циклы управляющих импульсов переключателей преобразователя с пятью переключателями рассчитаны в соответствии с (4) и представлены в таблице 3.

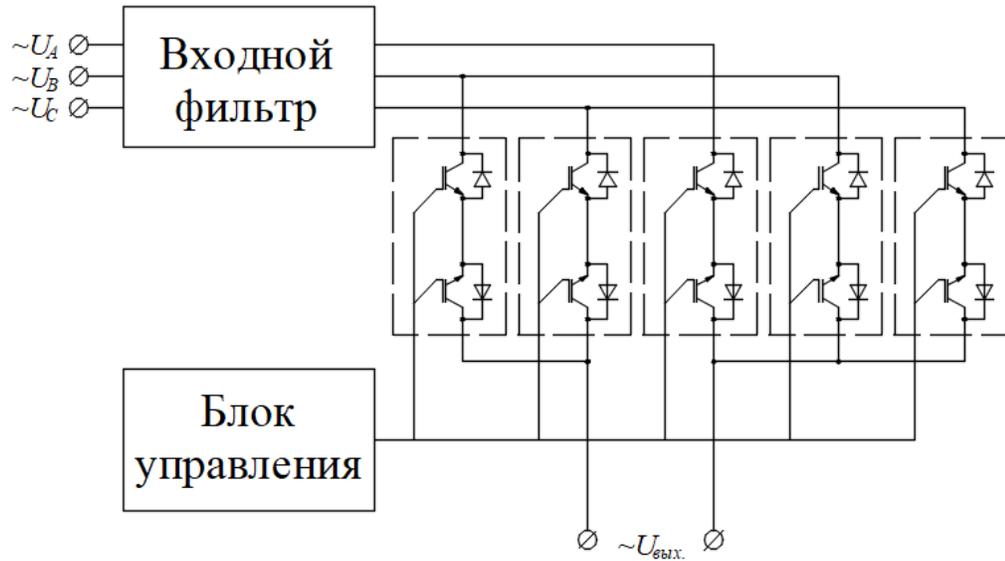


Рисунок 3 – Упрощенная электрическая схема матричного преобразователя с пятью переключателями

Использование МП с пятью переключателями позволяет использовать все свойства и достоинства классических МП с шестью переключателями, исключая возможность изменения выходной частоты, но с учетом подавляющего большинства сварочных ИП, работающих с трансформатором промышленной частоты, и это не недостаток.

Распределение сигналов управления переключателями в зависимости от количества секторов для положительной полярности выходного напряжения.

Таблица 1

Номер ключа	Сектор периода сети					
	1	2	3	4	5	6
$Q1$	$D_1$	$I$	$D_1$	$0$	$I-D_2- D_3$	$0$
$Q2$	$I-D_4- D_3$	$0$	$D_2$	$I$	$D_2$	$0$
$Q3$	$D_3$	$0$	$I-D_1- D_2$	$0$	$D_3$	$I$
$Q4$	$0$	$I-D_5- D_6$	$0$	$D_4$	$I$	$D_4$
$Q5$	$I$	$D_3$	$0$	$I-D_4- D_6$	$0$	$D_5$
$Q6$	$0$	$D_6$	$I$	$D_6$	$0$	$I-D_4- D_5$

Распределение сигналов управления переключателями в зависимости от номера сектора для отрицательной полярности выходного напряжения (таблица 2).

Таблица 2

Номер ключа	Сектор периода сети					
	1	2	3	4	5	6
$Q1$	$0$	$I-D_5- D_6$	$0$	$D_4$	$I$	$D_4$
$Q2$	$I$	$D_3$	$0$	$I-D_4- D_6$	$0$	$D_5$
$Q3$	$0$	$D_6$	$I$	$D_6$	$0$	$I-D_4- D_5$
$Q4$	$D_1$	$I$	$D_1$	$0$	$I-D_2- D_3$	$0$
$Q5$	$I-D_4- D_3$	$0$	$D_2$	$I$	$D_2$	$0$
$Q6$	$D_3$	$0$	$I-D_1- D_2$	$0$	$D_3$	$I$

В результате математического моделирования в пакете MatLab были получены диаграммы входных токов, выходного напряжения и тока МП с пятью ключами (рисунки 4, 5). Параметры МП следующие: частота коммутации 3,2 кГц, заданное выходное напряжение прямоугольное, с частотой 50 Гц и значением амплитуды 300 В; индуктивность рассеяния, приведенная к первичной обмотке, составляет 0,6 мГн, активное сопротивление 2,5 Ом; индуктивность входного фильтра 0,1 мГн, емкость входного фильтра 24 мФ. Коэффициент несинусоидального входного тока фазы,

синхронизированного с выходным напряжением преобразователя, находящегося на частоте переключения после изменения компонентов, составляет около 5,5%. Коэффициент мощности около 94,8%, коэффициент несимметрии входных токов по обратной последовательности около 4%.

Распределение сигналов управления переключателями в зависимости от количества секторов для формирования выходного напряжения матричного преобразователя с пятью переключателями (таблица 3).

Таблица 3

Номер ключа	Сектор периода сети					
	1	2	3	4	5	6
$Q1$	$1$	$D_2$	$0$	$1$	$D_2$	$0$
$Q2$	$0$	$D_3$	$1$	$0$	$D_3$	$1$
$Q3$	$D_4$	$1$	$D_4$	$D_4$	$1$	$D_4$
$Q4$	$D_5$	$0$	$D_5$	$D_5$	$0$	$D_5$
$Q5$	$D_6$	$0$	$D_6$	$D_6$	$0$	$D_6$

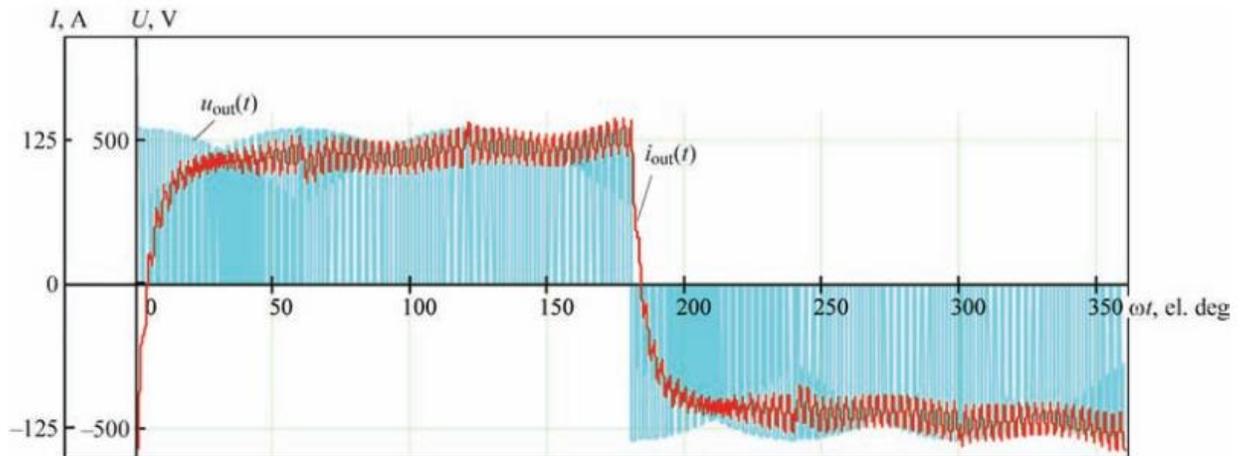


Рисунок 4 – Диаграммы выходных напряжений и тока матричного преобразователя с пятью ключами

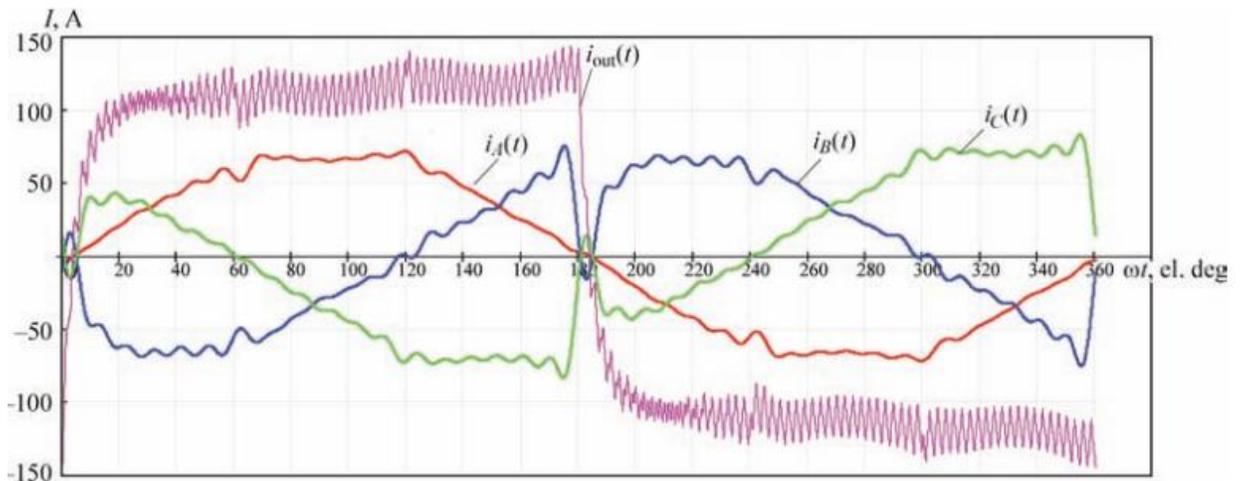


Рисунок 5 – Диаграммы входных токов матричного преобразователя с пятью ключами и его выходные токи

Выбор частоты был предопределен применением сварочного трансформатора, рассчитанного на работу от сетевой частоты. Форма напряжения выбиралась из условий обеспечения минимальных потерь мощности в сети и недопустимости насыщения сварочного трансформатора. Коэффициент мощности описываемых ИП аппаратов контактной сварки значительно выше, чем у использующих тиристорные ИП, который обычно составляет около 60% [5]. Кроме того, переключение аппарата однофазной контактной сварки на трехфазную сеть с использованием описанного ИП не приводит к возникновению асимметрии и обеспечивает симметричное потребление токов, близкое по форме к синусоидальному.

Еще один положительный эффект дает применение МП для питания АКС. При переключении сварочного трансформатора от сети напрямую через БТИЗ контактор [10]  $U_{\max}$ , подаваемое на первичную обмотку, достигает  $\sqrt{3}U_{\phi}$ . Выходное напряжение МП не выше  $1,5U_{\phi}$ . Но при прямоугольной форме  $U_{\text{вых}}$  МП с максимальной амплитудой  $1,5U_{\phi}$  фактическое значение первой гармоники напряжения будет составлять  $6U_{\phi}/\pi$ , что позволяет снизить чувствительность к отклонениям сетевого напряжения, обеспечить запас по напряжению около 10% и повысить качество сварных соединений.

### **Заключение**

1. По результатам моделирования применение описанных преобразователей и способы их управления позволили добиться высокого качества процесса контактной сварки, обеспечив тем самым высокий коэффициент мощности ИП и его электромагнитную совместимость с питающей электросетью.

2. Был выполнен обзор чувствительности порекомендованного источника питания к отклонениям напряжений, вследствие которого установлено, что при генерации напряжения прямоугольной формы можно добиться стабильной работы при отклонениях напряжения около 10%, что связано со значительным повышением качества сварных соединений.

### **Литература**

1. Pismenny, A.A. (2014) Improvement of power efficiency of machines for resistance spot welding by longitudinal compensation of reactive power. The Paton Welding J., 1, 25–29.

2. Rudenko, P.M., Gavrish, V.S. (2013) Thyristor direct converters for supply of resistance welding machines. Ibid., 8, 54–56.

3. Rymar, S.V., Zhernosekov, A.M., Sidorets, V.N. (2011) Effect of single-phase power sources of welding arc on electric mains. Ibid., 12, 7–12.

4. Сафронов П.С., Бондаренко Ю.В., Бондаренко О.Ф. (2014) Улучшение электромагнитной совместимости мощных источников для систем контактной сварки. Технична Электродинамика. – №5. –89–91.

5. Вагин, Г.Я. (1985) Режимы электросварочных аппаратов. – М.: Энергоатомиздат.

6. Поднебенная С.К., Бурлака В.В., Гулаков С.В., Скосырев В. Г. (2017) Источник питания машины контактной сварки с улучшенной электромагнитной совместимостью. Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: технические науки. №35. – 162–168.

7. Вагнер М., Колб С. (2013) Повышение эффективности для высокочастотной контактной точечной сварки. В: Proc. 15-й Европейская конф. по силовой электронике и приложениям (EPE), 1–9.

8. Омельченко Е. Я. Мощность при переходных процессах в трёхфазной LR-цепи. –М.: 2008. – Электрика. – С. 34–38.

9. Эралиева Г. Ш., Абдыбаева Ж. К., Асан уулу А., Суюнтбекова Н. А. Исследование переходных процессов в неоднородных цепных схемах на основе компьютерного моделирования. – Б., 2021. – Проблемы автоматки и управления №2(41), 100–108.

10. Бакасова А.Б., Асанов М.С., Сатаркулов К. Расширенные варианты использования гидроветряной электроустановки и автоматическая стабилизация режимов ее работы. Проблемы автоматки и управления. –Б. 2021.– №3(42).– С. 4–14.

УДК 658.261.001.63:502.174.3

*С.М. Асанова<sup>1</sup>, [a\\_sm07@mail.ru](mailto:a_sm07@mail.ru),*

*С.М. Суеркулов<sup>2</sup>, [s\\_suerkulov@list.ru](mailto:s_suerkulov@list.ru),*

*А.Б. Бакасова<sup>3</sup>, [bakasovaaina@mail.ru](mailto:bakasovaaina@mail.ru),*

*К. Сатаркулов<sup>3</sup>, М.С. Асанов<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова,  
720044, Кыргызстан, г. Бишкек, пр. Мира, 66,*

*<sup>2</sup>ТЭЦ города Бишкека, 720070, Кыргызстан, г. Бишкек, пр. Жибек Жолу, 326,*

*<sup>3</sup>Институт машиноведения и автоматизации Национальной академии наук  
Кыргызской Республики, 720055, Кыргызстан, г. Бишкек, ул. Скрыбина, 23,*

## **МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АВТОНОМНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ**

В работе предложена методика проектирования интеллектуальных систем автономных распределенных гибридных энергокомплексов (АРГЭК), обеспечивающих минимум потребляемой энергии от глобальной (общегосударственной) сети и дизельных электростанций для электроснабжения региональных бытовых и/или промышленных потребителей за счет максимального полезного использования энергии, генерируемых на основе возобновляемых источников энергии в самих системах АРГЭК как в нормальных, так и в аварийных режимах их функционирования, т.е. за счет аккумуляции излишков энергии в период ее избытка и отдачи потребителям в период дефицита; минимизации потерь электрической энергии путем эффективного управления потоками мощностей, циркулируемых в системах АРГЭК. Методика включает следующие этапы (подзадачи): разработка структуры распределенной гибридной системы генерации и транспортировки электроэнергии от источников до потребителей; разработка системы диагностики отказов генерирующих агрегатов и обрывов проводов на участках локальных сетей транспортировки электроэнергии и управления, по результатам диагностики, потоками мощностей, циркулируемых в системах АРГЭК как в нормальных, так и в аварийных режимах, с целью обеспечения баланса мощностей и минимизации их потерь.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии; автономный распределенный гибридный энергокомплекс; интеллектуальные системы; распознавание обрывов проводов; система диагностики и управления; энергетический баланс; потери электроэнергии.

**Введение.** Общеизвестно, что приоритетным и перспективным направлением развития современной энергетики является разработка и внедрение автономных энергокомплексов, функционирующих на возобновляемых (нетрадиционных) источниках энергии (ВИЭ), область практического применения которых можно разбить на два направления:

- автономные энергокомплексы для децентрализованного электроснабжения потребителей, территориально расположенные в отдаленных труднодоступных районах и не имеющие доступ к глобальной (общегосударственной) сети (ГС). Такие комплексы обычно функционируют за счет энергии, получаемой от дизельных электростанций (ДЭС) и ВИЭ [1-5];

- автономные энергокомплексы для электроснабжения потребителей целого региона, имеющие доступ к ГС. Такие комплексы функционируют за счет энергии,

получаемой из ГС, ДЭС, ВИЭ. Назначением этих комплексов является разгрузка глобальной энергосистемы за счет использования энергии ДЭС и ВИЭ [6]. Следует отметить, что комплексы такого класса могут быть использованы также для электроснабжения отдельных промышленных предприятий.

В вышеуказанной работе [6] разработана методика создания универсальной системы автоматизированного проектирования автономных распределенных гибридных энергокомплексов (АРГЭК) и методика управления энергетическим балансом в них, т.е. потоками мощностей, циркулирующих в этой системе. Предложенная обобщенная схема методики проектирования АРГЭК состоит из следующих этапов: исследование и создание базы статистических данных об электрических нагрузках потребителей, о скорости ветра рассматриваемого региона, о гидроэнергетических ресурсах горных и равнинных рек, о солнечной энергии, а также исследование и создание базы знаний о преобразователях энергии ветра и энергии воды в электрическую энергию. Рассмотрена задача синтеза оптимальной структуры распределенной гибридной системы генерации, обеспечивающей требуемый уровень генерируемой мощности и минимальную стоимость.

Настоящая работа является логическим продолжением вышеуказанной работы [6] и посвящена разработке методики проектирования интеллектуальных систем АРГЭК, обеспечивающих минимум потребляемой энергии от ГС и ДЭС для электроснабжения региональных бытовых и/или промышленных потребителей за счет максимального полезного использования энергии, генерируемых на основе ВИЭ в самих системах АРГЭК, как в нормальных, так и в аварийных режимах их функционирования, т.е. за счет:

- аккумуляирования излишков энергии с использованием систем аккумуляторных батарей (АКБ) в период ее избытка и отдачи потребителям в период дефицита;
- минимизации потерь электрической энергии путем эффективного управления потоками мощностей, циркулируемых в системах АРГЭК как в нормальных, так и в аварийных режимах.

Ниже приведена обобщенная функциональная схема интеллектуальной системы АРГЭК и краткое описание методики ее проектирования.

### 1. Обобщенная функциональная схема интеллектуальной системы АРГЭК.

В общем случае в состав интеллектуальной системы АРГЭК, как показано на рис. 1, входят следующие:

- РГСГ – распределенная гибридная система генерации, состоящая в свою очередь из распределенных систем ветряных генераторов (ВГ), гидрогенераторов (ГГ) и солнечных батарей (СБ), где  $W_{ВГ}(t)$ ,  $W_{ГГ}(t)$ ,  $W_{СБ}(t)$  – вырабатываемые ими мощности соответственно;  $\Delta W_{РГСГ}(t)$  – потери электроэнергии в сети;

- ПЭ – множество потребителей электрической энергии  $ПЭ = \{ПЭ_i | i \in N_{ПЭ}\}$ , где  $N_{ПЭ} = \{1, 2, \dots, p\}$ ,  $p$  – количество потребителей;

- ЛС<sub>ПЭ</sub> – локальная сеть для транспортировки мощности  $W_{П}(t)$  до потребителей  $ПЭ_i | i \in N_{ПЭ}$  с потребляемыми мощностями, соответственно  $W_{ПЭ_i} | i \in N_{ПЭ}$ , с потерей электроэнергии в сети  $\Delta W_{ЛС}(t)$ ;

- ДГ – дизельный генератор, вырабатывающий мощность  $W_{ДГ}^{(+)}(t)$  при дефиците электроэнергии в АРГЭК;
- ГС – глобальная (общегосударственная) сеть, отдающая мощность  $W_{ГС}^{(+)}(t)$  при дефиците электроэнергии в системе АРГЭК и забирающая мощность  $W_{ГС}^{(-)}(t)$  при ее избытке в АРГЭК;
- НРПМ – система накопления, распределения потоков мощностей;
- СДУ – система диагностики и управления АРГЭК, производящая:
  - а) диагностику элементов системы РГСГ на основе вектора наблюдения за состоянием ее элементов  $y_{РГСГ}(t)$ ;
  - б) управление процессами, протекающими в НРПМ, где  $y_{НРПМ}(t)$  – вектор наблюдения за состоянием системы НРПМ;  $u_{НРПМ}(t)$  – вектор управления;
  - в) диагностику элементов и управления структурой локальной сети ЛСПЭ, где  $y_{ЛС}(t)$  – вектор наблюдения за состоянием элементов сети;  $y_{ПЭ}(t)$  – вектор наблюдения электропотреблением;  $u_{ЛС}(t)$  – вектор управления структурой сети.

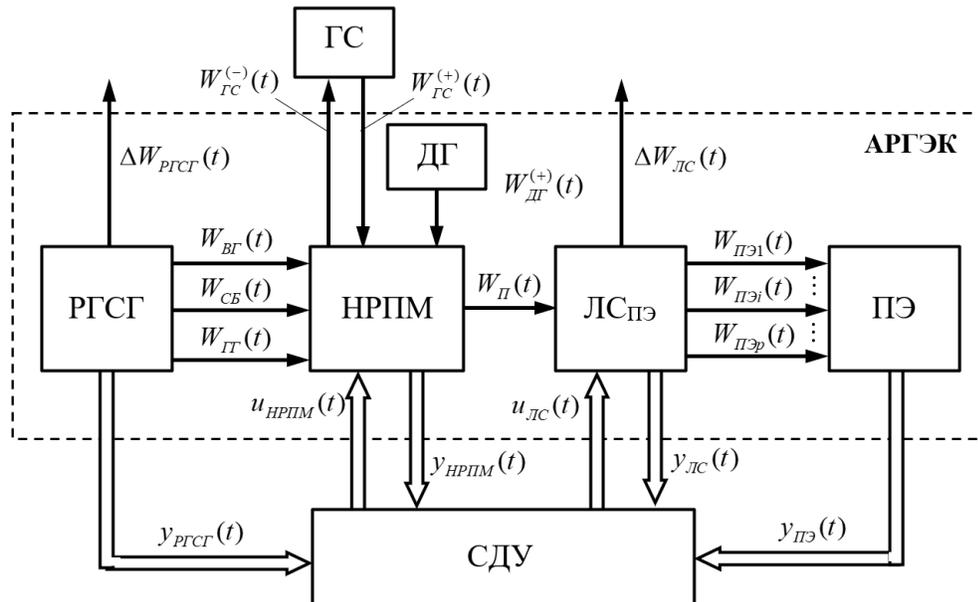


Рисунок 1 – Функциональная схема интеллектуальной системы АРГЭК

## 2. Обобщенная схема методики проектирования интеллектуальных систем АРГЭК.

Схема проектирования интеллектуальной системы АРГЭК включает в себя следующие этапы.

*Этап 1.* Разработка структуры распределенной гибридной системы генерации РГСГ (см. рис. 2).

*Шаг 1.* Разработка структуры системы ветряных генераторов (ВГ), выдаваемая в АРГЭК мощность  $W_{ВГ}(t)$  (см. рис. 2)

$$W_{BG}(t) = \sum_{j \in N_{BG}} W_j^{BG}(t) - \Delta W_j^{BG}(t) \quad (1)$$

$$N_{BG} = \{1, 2, \dots, n_{BG}\},$$

где  $W_j^{BG}(t)$  – мощность, вырабатываемая  $j$ -м ветряным генератором  $BG_j$  из множества  $BG = BG_j | j \in N_{BG}$ ;  $\Delta W_j^{BG}(t)$  – мощность, расходуемая на собственные нужды  $j$ -м агрегатом  $BG_j$ ;  $N_{BG}$  – множество номеров агрегатов;  $n_{BG}$  – число агрегатов в системе ВГ;  $t$  – текущее время.

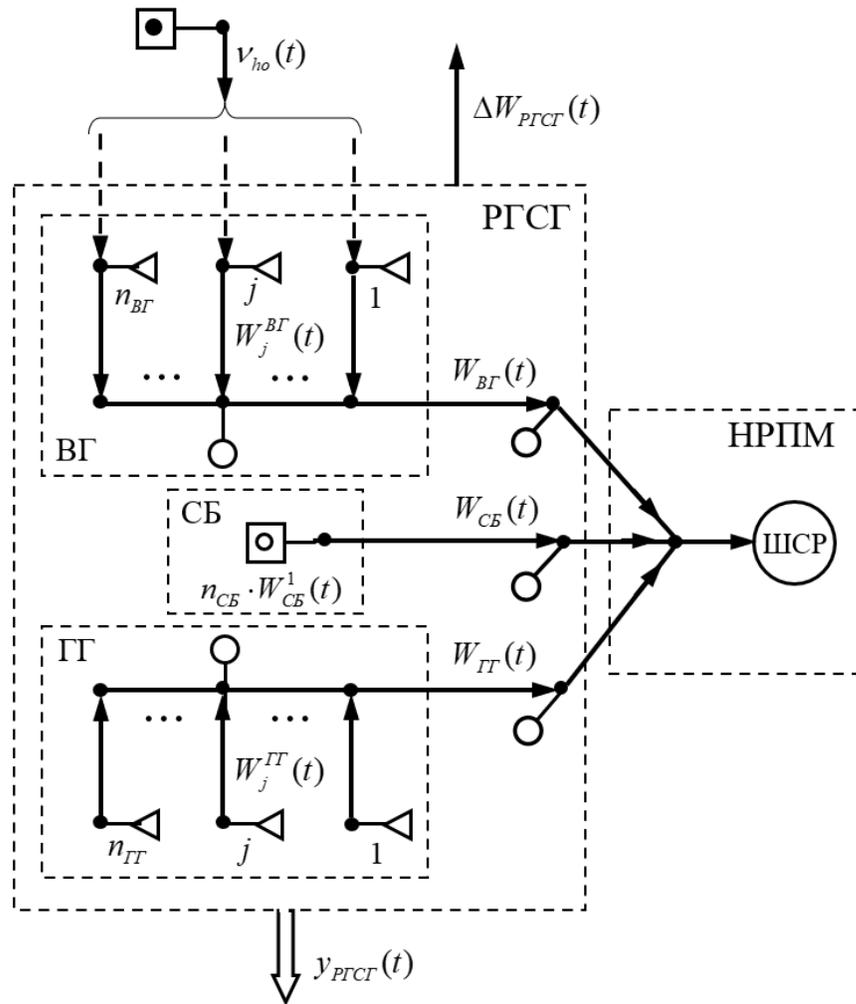


Рисунок 2 – Граф системы РГСГ, распознающей обрывы проводов на ее участках,

- где
- - - - - ветровой поток;
  - → → → → силовая линия электропередачи;
  - → → → → информационная векторная стрелка;
  - датчик скорости ветра;
  - датчик мощности одной панели солнечной батареи;
  - датчик мощности на выходе генерирующих агрегатов (или тока и напряжения);
  - датчик тока информационного провода многофункциональной линии электропередачи

*Шаг 2.* Разработка структуры системы гидрогенераторов (ГГ), выдаваемой в АРГЭК мощность  $W_{ГГ}(t)$  (см. рис. 2)

$$W_{ГГ}(t) = \sum_{j \in N_{ГГ}} W_j^{ГГ}(t) - \Delta W_j^{ГГ}(t), \quad (2)$$

$$N_{ГГ} = \{1, 2, \dots, n_{ГГ}\},$$

где  $W_j^{ГГ}(t)$  – мощность, вырабатываемая  $j$ -м гидрогенератором  $ГГ_j$  из множества  $ГГ = ГГ_j | j \in N_{ГГ}$ ;  $\Delta W_j^{ГГ}(t)$  – мощность, расходуемая на собственные нужды  $j$ -м агрегатом  $ГГ_j$ ;  $N_{ГГ}$  – множество номеров агрегатов;  $n_{ГГ}$  – число агрегатов в системе ГГ.

*Шаг 3.* Разработка структуры системы солнечных батарей (СБ), выдаваемой в АРГЭК мощность  $W_{СБ}(t)$

$$W_{СБ}(t) = n_{СБ} \cdot W_{СБ}^1(t), \quad (3)$$

где  $W_{СБ}^1(t)$  – мощность, вырабатываемая одной панелью солнечных батарей;  $n_{СБ}$  – количество панелей в системе СБ.

*Шаг 4.* Разработка структуры локальной сети (ЛС<sub>РГСГ</sub>) системы РГСГ для транспортировки мощностей (см. рис. 2)

$$\begin{aligned} W_{ВГ}(t) \cup W_{ГГ}(t) \cup \{W_{СБ}(t)\} = \\ = \{W_j^{ВГ}(t) | j \in N_{ВГ}\} \cup \{W_j^{ГГ}(t) | j \in N_{ГГ}\} \cup \{W_{СБ}(t)\}, \end{aligned} \quad (4)$$

генерируемых агрегатами и системой солнечных батарей соответственно

$$\begin{aligned} ВГ \cup ГГ \cup \{СБ\} = \\ = \{ВГ_j | j \in N_{ВГ}\} \cup \{ГГ_j | j \in N_{ГГ}\} \cup \{СБ\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Данная локальная сеть ЛС<sub>РГСГ</sub> имеет древовидную структуру, где корнем графа сети является шина сборки и распределения (ШСР) системы НРПМ, а концевыми узлами – узлы присоединения генерирующих агрегатов и системы солнечных батарей из (5).

*Примечание 1.* Все мощности переменного тока, вырабатываемые генерирующими агрегатами, преобразовываются и передаются в виде мощностей постоянного тока по сети ЛС<sub>РГСГ</sub>. Это делается для снятия проблемы синхронизации генерирующих агрегатов.

*Шаг 5.* Разработка структуры распределенной электрической системы, распознающей обрывы проводов на участках локальной сети ЛС<sub>РГСГ</sub> (см. рис. 2). Решение данной задачи основывается на методе, опубликованном в [7]:

- Граф сети ЛС<sub>РГСГ</sub> разбивается на  $n_{ПГ}$  подграфов (ПГ).
- В качестве линий электропередачи, соответствующих этим подграфам, используются многофункциональные провода с изолированной жилой, через которую передается информация (информационный провод).

- Разрабатывается схема постоянного тока для каждого  $j$ -го подграфа на основе информационного провода и набора сопротивлений  $\{R_i | i \in N_R\}$ ,  $N_R = \{1, 2, \dots, n_R\}$  с соответствующими величинами, которые необходимо рассчитать. Отметим, что структура разрабатываемой схемы совпадает со структурой подграфа сети.

- Со стороны корня рассматриваемого  $j$ -го подграфа информационный провод подсоединяется к источнику постоянного напряжения  $U_j^{III}$  и датчику тока (см. рис. 2), показание которого, т.е.  $I_j^{III}$ , несет информацию о состоянии участков (произошел обрыв или нет) данного  $j$ -го подграфа, где  $j \in N_{ПГ} = \{1, 2, \dots, n_{ПГ}\}$ .

*Примечание 2.* Измеряемыми величинами являются (см. рис. 2) мощности (или соответствующие токи и напряжения), вырабатываемые генерирующими агрегатами и системой солнечных батарей (см. формулы (1)-(5)), токи  $\{I_j^{III}(t) | j \in N_{ПГ}\}$  информационных проводов подграфов графа сети ЛС<sub>РГСГ</sub> и скорость ветра  $v_{h_0}(t)$  для заданной высоты (уровня)  $h_0$  (для метеостанций принято  $h_0 = 10$  м):

$$\begin{aligned} & \{W_j^{BG}(t) | j \in N_{BG}\} \cup \{W_j^{GT}(t) | j \in N_{GT}\} \cup \{W_{CB}(t)\} \cup \\ & \cup \{I_j^{III}(t) | j \in N_{ПГ}\} \cup \{v_{h_0}(t)\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Если считать, что множества из (6) упорядочены по номерам из множеств  $N_{BG}$ ,  $N_{GT}$ ,  $N_{ПГ}$ , то множество (6) можно принять как вектор наблюдения  $y_{РГСГ}(t)$

$$y_{РГСГ}(t) = [\text{формула из (6)}] \quad (7)$$

*Этап 2.* Разработка структурно управляемой локальной сети ЛС<sub>ПЭ</sub>, распознающей обрывы проводов на ее участках (см. рис. 3).

*Шаг 6.* Разработка структуры замкнутой сети ЛС<sub>ПЭ</sub> с заданным уровнем надежности  $H_{ЛС_{ПЭ}}$  электроснабжения потребителей  $ПЭ = \{ПЭ_i(t) | i \in N_{ПЭ}\}$ , мощности электропотребления которых соответственно  $\{W_{ПЭ_i}(t) | i \in N_{ПЭ}\}$ ,  $N_{ПЭ} = \{1, 2, \dots, p\}$ , где  $p$  – количество потребителей.

*Шаг 7.* На основе полученной замкнутой сети ЛС<sub>ПЭ</sub> построить сеть с управляемой структурой, позволяющей изменять маршруты движения потоков мощностей от источника энергии на узле  $i=0$  до потребителей  $ПЭ = \{ПЭ_i(t) | i \in N_{ПЭ}\}$  при существенном изменении нагрузок отдельных потребителей и обрыве линии отдельных участков с целью минимизации потери мощности  $\Delta W_{ЛС}(t)$  в сети ЛС<sub>ПЭ</sub> [8]. Для этого на каждой  $j$ -й ветви замкнутой сети ЛС<sub>ПЭ</sub> ставится управляемый ключ  $K_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n_{ЛС}$ , где  $n_{ЛС}$  – количество ветвей,  $K_j \in \{0, 1\}$ .

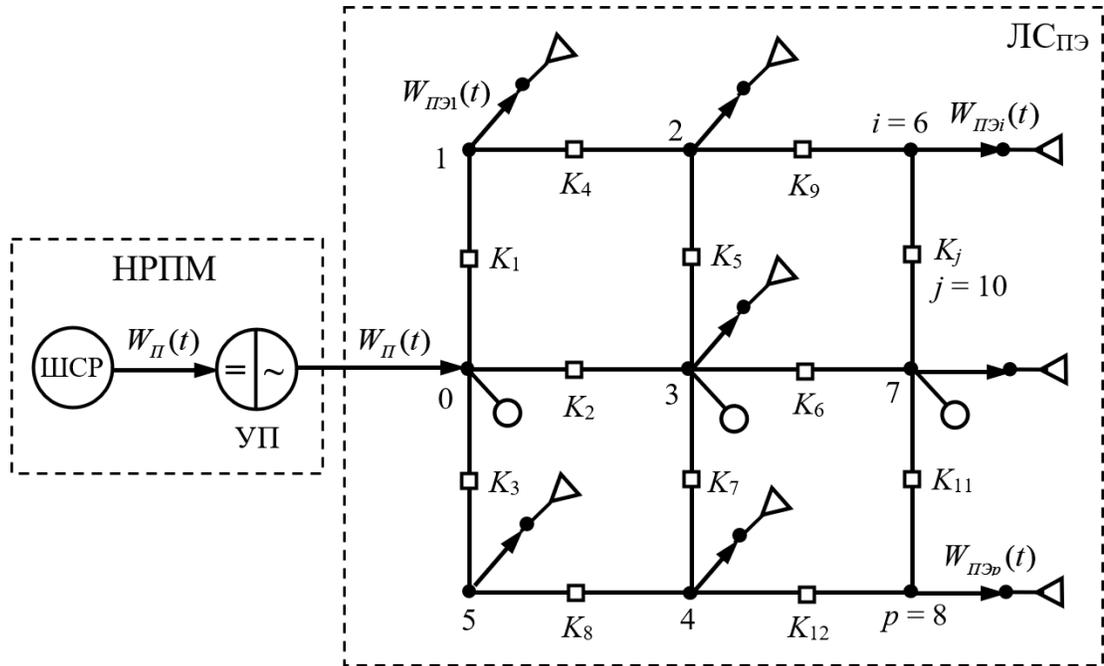


Рисунок 3 – Граф структурно управляемой локальной сети ЛСПЭ, распознающей обрывы проводов на ее участках

где  –преобразователь мощности постоянного тока в переменный;

*Шаг 8.* Разработка структуры распределенной электрической системы, распознающей обрывы проводов на участках замкнутой локальной сети ЛСПЭ. Решение данной задачи, как и на шаге 5, основывается на методике, опубликованной в [7]. Задача разработки, рассматриваемая на данном шаге, усложняется в сравнении с задачей из шага 5 тем, что рассматриваемая здесь сеть ЛСПЭ является сложнзамкнутой трехфазной сетью.

*Примечание 3.* Измеряемыми величинами являются (см. рис. 3) мощности (или соответствующие токи и напряжения) на узлах нагрузки  $\{W_{IIЭi}(t) | i \in N_{IIЭ}\}$  и токи  $\{I_j^{III}(t) | j \in N_{III}\}$ . Если считать, что эти множества упорядочены по номерам из множеств  $N_{IIЭ}$ ,  $N_{III}$ , то в качестве векторов наблюдения  $y_{IIЭ}(t)$ ,  $y_{ЛС}(t)$  можно принять

$$y_{IIЭ}(t) = [\{W_{IIЭi}(t) | i \in N_{IIЭ}\}], \quad (8)$$

$$y_{ЛС}(t) = [\{I_j^{III}(t) | j \in N_{III}\}]. \quad (9)$$

Вектором управления  $u_{ЛС}(t)$  является упорядоченное множество  $\{K_j | j \in N_K\}$  по номерам из множества  $N_K = \{1, 2, \dots, n_{ЛС}\}$ :

$$u_{ЛС}(t) = [\{K_j | j \in N_K\}], \quad K_j \in \{0, 1\}, \quad (10)$$

где при  $K_j = 0$ ,  $j$ -й управляемый ключ отключен, а при  $K_j = 1$  включен.

*Этап 3.* Разработка структуры управляемой системы НППМ, т.е. структуры системы накопления и распределения потоков мощностей (см. рис. 4).

Шаг 9. Разработка структуры системы НРПМ, реализующей один из основных принципов, заложенных в логику функционирования интеллектуальной системы АРГЭК: минимальное потребление мощности от ГС и ДЭС за счет максимального полезного использования мощности, вырабатываемой системой РГСГ, путем аккумуляирования излишков энергии в период ее избытка и отдачи потребителям в период дефицита. Один из возможных вариантов таких структур показан в виде графа на рис. 4.

Элементом графа соответствуют:

- сумматор  $\Sigma$  неуправляемых мощностей  $W_{BG}(t)$ ,  $W_{CB}(t)$ ,  $W_{GT}(t)$ , вырабатываемых генерирующими агрегатами соответственно ВГ, СБ, ГГ системы РГСГ, функционирующих на основе ВИЭ. Мощности  $W_{BG}(t)$ ,  $W_{CB}(t)$  (см. (1), (3)) имеют стохастический (непредсказуемый) характер ввиду стохастичности ВИЭ. Для снятия проблемы синхронизации мощностей переменного тока  $\{W_j^{BG}(t) | j \in N_{BG}\} \cup \{W_j^{GT}(t) | j \in N_{GT}\}$  (см. (1), (2)), вырабатываемых генерирующими агрегатами, соответственно,  $\{BG_j | j \in N_{BG}\} \cup \{GT_j | j \in N_{GT}\}$ , они преобразованы в мощности постоянного тока. Суммарная мощность  $W_G(t)$  (см. (1)-(3)):

$$W_G(t) = W_{BG}(t) + W_{CB}(t) + W_{GT}(t) - \Delta W_{PGC}(t) = \sum_{j \in N_{BG}} W_j^{BG}(t) - \Delta W_j^{BG}(t) + n_{CB} \cdot W_{CB}^1(t) + \sum_{j \in N_{GT}} W_j^{GT}(t) - \Delta W_j^{GT}(t) - \Delta W_{PGC}(t) \quad (11)$$

- глобальная сеть ГС, используемая как управляемый источник мощности  $W_{GC}^{(+)}(t)$  при ее чрезмерном дефиците, а при необходимости как управляемый потребитель мощности  $W_{GC}^{(-)}(t)$  при ее чрезмерном избытке в системе НРПМ.

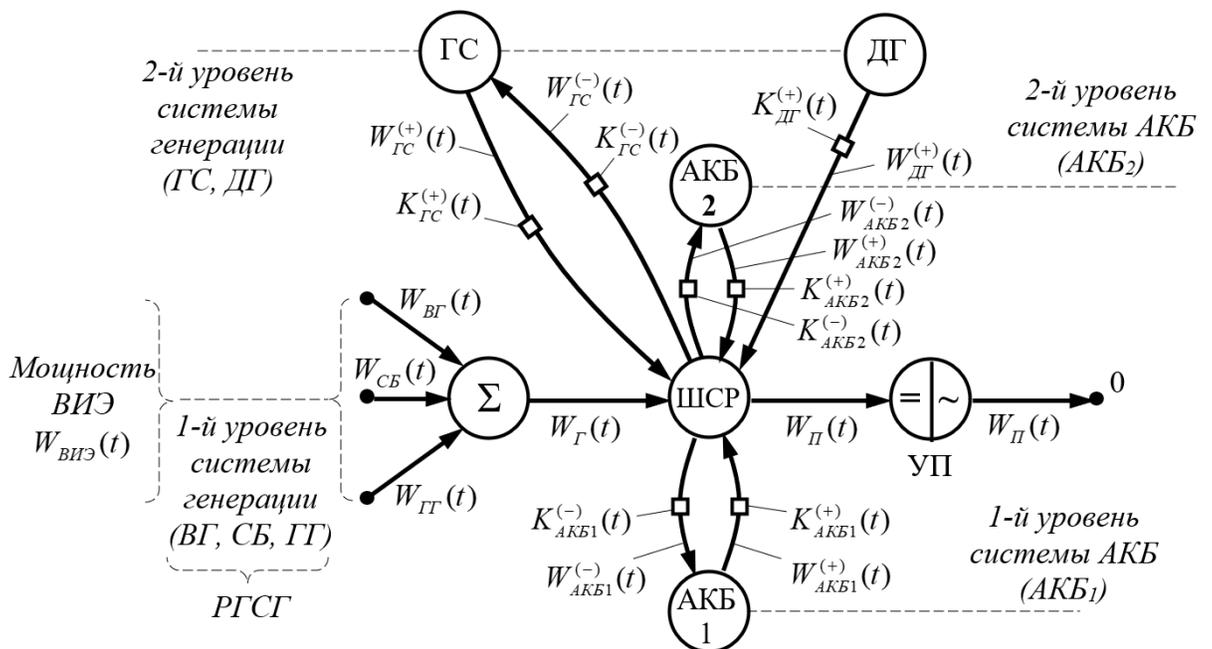


Рисунок 4 – Граф структуры управляемой системы НРПМ

- для повышения надежности электроснабжения при дефиците мощности ВИЭ и в ГС используется дополнительный управляемый источник мощности  $W_{ДГ}^{(+)}(t)$  в виде дизельного генератора ДГ.

- УП – устройство преобразования мощности постоянного тока  $W_{П}(t)$  в мощность переменного тока, которую локальная сеть ЛС<sub>ПЭ</sub> транспортирует и распределяет по потребителям  $ПЭ = \{ПЭ_i | i \in N_{ПЭ}\}$ .

$$W_{П}(t) = \sum_{i \in N_{ПЭ}} W_{ПЭ_i}(t) + \Delta W_{ЛС}(t) \quad (12)$$

- АКБ<sub>1</sub> – система аккумуляторных батарей первого уровня аккумуляции энергии, предназначенная для обеспечения баланса мощностей, циркулируемых в НРПМ при нормальных режимах функционирования систем РГСГ, ЛС<sub>ПЭ</sub>, ПЭ и изменении потенциальных мощностей ВИЭ и мощности потребления  $W_{П}(t)$  в пределах их доверительных интервалов, оцененных на основе статистических данных на этапе синтеза оптимальной структуры системы РГСГ [6]. Здесь:  $W_{АКБ1}^{(-)}(t)$ ,  $W_{АКБ1}^{(+)}(t)$  – соответственно, зарядная, разрядная мощности.

- АКБ<sub>2</sub> – система аккумуляторных батарей второго уровня аккумуляции энергии, предназначенная для поддержания, совместно с АКБ<sub>1</sub>, ГС и ДГ, баланса мощностей в НРПМ при аварийных режимах функционирования систем РГСГ, ЛС<sub>ПЭ</sub>, ПЭ и выходе потенциальных мощностей ВИЭ и мощности потребления  $W_{П}(t)$  за пределы их доверительных интервалов. Здесь:  $W_{АКБ2}^{(-)}(t)$ ,  $W_{АКБ2}^{(+)}(t)$  – соответственно, зарядная, разрядная мощности.

- ШСР – шина сборки и распределения мощностей, циркулируемых в НРПМ:

$$\{W_{П}(t), W_{Г}(t), (W_{ГС}^{(+)}(t), W_{ГС}^{(-)}(t)), W_{ДГ}^{(+)}(t), (W_{АКБ1}^{(+)}(t), W_{АКБ1}^{(-)}(t)), (W_{АКБ2}^{(+)}(t), W_{АКБ2}^{(-)}(t))\} \quad (13)$$

- Управляемые ключи на дугах графа

$$\{(K_{ГС}^{(+)}(t), K_{ГС}^{(-)}(t)), K_{ДГ}^{(+)}(t), (K_{АКБ1}^{(+)}(t), K_{АКБ1}^{(-)}(t)), (K_{АКБ2}^{(+)}(t), K_{АКБ2}^{(-)}(t))\} \quad (14)$$

являются условными, т.е. использование их в реальных схемах реализации процесса управления потоками мощностей из (13) не является обязательным, так как процессоры включения/отключения преобразователей могут быть легко обеспечены за счет управления транзисторами их силовой части [2]. Они используются здесь для большей наглядности и удобства описания логики алгоритма управления и процесса циркуляции потоков (13) в системе НРПМ. Каждый управляемый ключ из (14) может принимать одно из двух состояний  $\{0, 1\}$ , при этом если 0, то соответствующая ветвь отключена, в противном случае, т.е. при 1 – включена.

*Примечание 4.* Измеряемыми величинами являются генерируемая  $W_{Г}(t)$ , потребляемая  $W_{П}(t)$  мощности (см. (13)), состояние  $C_{АКБ1}$ ,  $C_{АКБ2}$  соответственно АКБ<sub>1</sub>,

АКБ<sub>2</sub> и напряжение  $U_{ШСР}(t)$  на шине ШСР, из которых формируется вектор наблюдения  $y_{НРПМ}(t)$  за состоянием системы НРПМ:

$$y_{НРПМ}(t) = [W_G(t), W_D(t), C_{АКБ1}(t), C_{АКБ2}(t), U_{ШСР}(t)] \quad (15)$$

Вектор управления  $u_{НРПМ}(t)$  процессом циркуляции потоков мощностей в управляемой системе НРПМ состоит из следующих компонентов (см. (13)):

$$u_{НРПМ}(t) = \left[ (W_{ГС}^{(+)}(t), W_{ГС}^{(-)}(t)), W_{ДГ}^{(+)}(t), (W_{АКБ1}^{(+)}(t), W_{АКБ1}^{(-)}(t)), (W_{АКБ2}^{(+)}(t), W_{АКБ2}^{(-)}(t)) \right] \quad (16)$$

*Этап 4.* Разработка СДУ, т.е. системы диагностики и управления, реализующей главную функцию интеллектуальной системы АРГЭК: минимизация потребляемой энергии от ГС и ДГ за счет максимально эффективного использования энергии, генерируемой на основе ВИЭ в самой системе АРГЭК путем эффективного управления потоками мощностей, циркулируемых в системе АРГЭК, начиная от их генерации до потребления, с целью минимизации их потерь.

*Шаг 10.* Разработка алгоритмов диагностики, позволяющих на основе информации, заложенной в векторах наблюдения  $y_{РГС}(t)$ ,  $y_{ЛС}(t)$  (см. (6)-(9)), распознавать отказы генерирующих агрегатов и солнечных батарей  $\{BG_j | j \in N_{BG}\}$ ,  $\{IG_j | j \in N_{IG}\}$ ,  $\{CB\}$  и обрывы проводов на участках локальных сетей  $ЛС_{РГС}$ ,  $ЛС_{ПЭ}$ .

*Шаг 11.* Разработка алгоритмов управления, позволяющих:

- по результатам диагностики и на основе текущей информации о нагрузках, заложенной в векторе наблюдения  $y_{ПЭ}(t)$  (8), управлять маршрутом движения потоков мощностей от источника энергии на узле  $i=0$  (см. рис. 3) до потребителей  $ПЭ = \{ПЭ_i(t) | i \in N_{ПЭ}\}$  с целью минимизации потерь мощности  $\Delta W_{ЛС}(t)$  в локальной сети  $ЛС_{ПЭ}$ ;

- по результатам диагностики и текущей информации, заложенной в векторе наблюдения  $y_{НРПМ}(t)$  (15), управлять потоками мощностей (16), циркулируемых в системе НРПМ, с целью минимизации потребляемой мощности от ГС и ДГ за счет максимального полезного использования мощности, вырабатываемой системой РГСГ, путем аккумуляции излишков энергии в период ее избытка и отдачи потребителям в период дефицита.

*Замечание.* Формальная постановка задачи и процедура синтеза вышеперечисленных алгоритмов вынесены за рамки настоящей работы.

**Заключение.** Таким образом, в данной работе была предложена методика проектирования интеллектуальных систем автономных распределенных гибридных энергокомплексов (АРГЭК), обеспечивающих минимум потребляемой энергии от глобальной (общегосударственной) сети и дизельных электростанций для электроснабжения региональных бытовых и/или промышленных потребителей за счет максимального полезного использования энергии, генерируемых на основе

возобновляемых источников энергии в самих системах АРГЭК, как в нормальных, так и в аварийных режимах их функционирования, т.е. за счет:

- аккумулярования излишков энергии в период ее избытка и отдачи потребителям в период дефицита;

- минимизации потерь электрической энергии путем эффективного управления потоками мощностей, циркулируемых в системах АРГЭК.

Методика включает следующие этапы (подзадачи):

- разработка структуры распределенной гибридной системы генерации и транспортировки электроэнергии от источников до потребителей;

- разработка системы диагностики отказов генерирующих агрегатов и обрывов проводов на участках локальных сетей транспортировки электроэнергии и управления по результатам диагностики потоками мощностей, циркулируемых в системах АРГЭК, как в нормальных, так и в аварийных режимах, с целью обеспечения баланса мощностей и минимизации их потерь.

В дальнейшем, на основе полученных результатов и их углубленной детализации, а также результатов из [5-9], планируется создание универсальной системы автоматизированного проектирования интеллектуальных АРГЭК (САПР АРГЭК) для электроснабжения региональных бытовых и/или промышленных потребителей. При разработке САПР АРГЭК будет использован математический аппарат вычислительных сетей Петри [11,12], который является дальнейшим развитием классической теории сетей Петри [13,14].

#### **Литература:**

1. Лукутин Б.В. Способы снижения расхода топлива дизельных электростанций / Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. // [Современные проблемы науки и образования](#). – 2013. – №2. – С. 139.
2. Обухов С.Г. Двухконтурный накопитель энергии для гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии / Обухов С.Г., Плотников И.А., Ибрагим А., Маслов В.Г. // Известия Томского университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 1. – С. 64–76.
3. Лукутин Б.В. Способы снижения расхода топлива дизельных электростанций / Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. // [Электричество](#). – 2012. – №6. – С. 24–29.
4. Бакасова А.Б. [Расширенные варианты использования гидроветряной электроустановки и автоматическая стабилизация режимов ее работы](#) / Бакасова А.Б., Асанов М.С., Сатаркулов К. // [Проблемы автоматики и управления](#). – 2021. – № 3 (42). – С. 4–14.
5. Asanov M.S. Algorithm for calculation and selection of micro hydropower plant taking into account hydrological parameters of small watercourses mountain rivers of Central Asia / Asanov M.S., Safaraliev M., Zhabudaev T., Kokin S.E., Asanova S.M., Dmitriev S.A., [Obozov A.J.](#), [Ghulomzoda A.H.](#) // [International Journal of Hydrogen Energy](#). – 2021. – [Volume 46, Issue 75](#). – P. 37109–37119.
6. Asanova S.M. Optimization of the structure of autonomous distributed hybrid power complexes and energy balance management in them / Asanova S.M., Kokin S.E., Dmitriev S.A., Safaraliev M., Arfan Kh., Zhabudaev T., Satarkulov T.K. // [International Journal of Hydrogen Energy](#). – 2021. – [Volume 46, Issue 70](#). – P. 34542-34549.
7. Asanova S.M. Method for designing drop-of-wire recognition systems on sections of undistorted two-wire power transmission lines / Asanova S.M., Askarbek N., Suerkulov S.M., Ahyoev J.S., Asanova D.U., Safaraliev M.K. // IOP Conference

- Series: Materials Science and Engineering. 2020 –15. Сер. "15th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy". – P. 012114.
8. Asanov M. The use of Petri computing networks for optimization of the structure of distribution networks to minimize power losses. / Asanov M., Asanova S.M., Kokin S., Satarkulov K., Dmitriev S., Safaraliev M. // [Energy Reports](#). – 2020. – Т. 6. – [№ Suppl. 9](#). – P. 1337–1343.
  9. Asanova S.M. [Mathematical modelling of mutual electromagnetic influences of related power transmission lines in a transition process MODE](#). / Asanova S.M., Suerkulov S.M., Safaraliev M.K., Asanova D.U., Milutin R.S. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. –2020. – 15. Сер. "15th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy". – P. 012113.
  10. Asanov M. Optimal amount of information determination for power system steady state estimation. / Asanov M., [Semenenko S.](#), [Matrenin P.](#), Asanova S.M., Safaraliev M., [Rusina A.](#) // [Energy Reports](#). – 2022. – Т. 8. – [№ Suppl. 1](#). – P. 1085–1092.
  11. М.С. Асанов. Структурная модель вычислительных сетей Петри / М.С. Асанов, С.М. Асанова, К.А. Сатаркулов. // Известия КГТУ. – 2008. – №13. – С. 78–85.
  12. М.С. Асанов, С.М. Асанова, К.А. Сатаркулов. Вычислительные компоненты, язык описания и правила функционирования вычислительных сетей Петри / М.С. Асанов, С.М. Асанова, К.А. Сатаркулов. // Известия КГТУ. – 2008. – №13. – С. 85–95.
  13. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 160 с.
  14. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем// Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 264 с.

УДК 550.82

А.У. Касимова, [adina.kasimova.99@mail.ru](mailto:adina.kasimova.99@mail.ru)С.Н. Верзунов, [verzunov@hotmail.com](mailto:verzunov@hotmail.com)

Институт машиноведения и автоматизации НАН КР

## ОБЗОР И АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

В данной статье были проанализированы современные методы измерения диэлектрической проницаемости горных пород. Были рассмотрены особенности и недостатки каждого метода, а также области, в которых каждый из методов является наиболее подходящим. Продемонстрированы зависимости диэлектрической проницаемости от частоты микроволнового излучения, а также показаны методы вычисления комплексной диэлектрической проницаемости различных материалов. Проанализировав все существующие методы, авторы рекомендуют метод свободного пространства как более подходящий метод измерения, который позволит получить наиболее достоверные и полные результаты. Метод свободного пространства является более подходящим методом по следующим причинам: не требуется обработка материалов; размеры образцов могут быть достаточно большими; можно использовать при высоких температурах; отсутствие механического контакта с образцом; возможность измерения магнитных материалов.

**Ключевые слова:** геофизика, диэлектрическая проницаемость, микроволновое излучение метод свободного пространства

### Введение

Как сказано в работе [1]: «измерение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в микроволновом диапазоне является актуальной задачей во многих областях фундаментальных и прикладных исследований». В качестве примеров можно привести работы [2-4]. Кроме того, «данные о диэлектрических характеристиках природных минералов (табл. 1) могут быть полезны в таких областях, как геология, сейсмология, горнодобывающая промышленность, и т.п. Экспериментальные данные о комплексной диэлектрической проницаемости (КДП), определяемой в широком частотном диапазоне, позволяют создавать и тестировать спектроскопические модели почв и горных пород, исследовать многочастотные релаксационные процессы» [1].

Таблица 1 – Диэлектрическая проницаемость минералов

Минералы	Частота поля, Гц	$\epsilon_{отн}$
<i>Самородные:</i>		
алмаз графит сера	$10^4 - 10^8$	16,5
<i>Хлориды и сульфаты:</i>		
галит сильвин ангидрит гипс барит	$10^2 - 10^7$	6,2-5,7 6,2-4,4 6,3-5,7 4,23-4,24 12,2-7
<i>Сульфиды:</i>		
галенит пирит арсенопирит сфалерит молибденит халькозин пирротин	$10^5 - 10^9$ -	81-17 12,1-6,9 12,1-6,9 81-33,7
<i>Карбонаты и фосфаты:</i>		
кальцит доломит сидерит церуссит	----	8,7-7,5 9,5-7,8 7,4-6,9 25,4-19,6
<i>Силикаты:</i>		
авгит актинолит эгирин роговая обманка тремолит альмандин альбит олигоклаз андезин лабрадор анортит	$10^2 - 10^7$ -----	10,3-6,9 6,6 7,2 5,8-4,9 7,6 4,3 5,63-5,39 6,06-6,03 6,2 6,47 6,51
<i>Окислы:</i>		
кварц лимонит рутил куприт касситерит гематит вода	$10^5 - 10^9$ -	4,59-4,54 11-10 173-86 6,35-5,65 170-25 [6]

«Исследование диэлектрических свойств горных пород в микроволновом диапазоне является технически сложной задачей из-за сильного поглощения электромагнитного

излучения в среде. Так как комплексная диэлектрическая проницаемость вещества, определяемая как:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + j\varepsilon_2, \quad (1)$$

где действительная часть ( $\varepsilon_1$ ) определяет поляризованность, а мнимая ( $\varepsilon_2$ ) – вносимые потери, сама по себе не поддается прямому измерению, то она рассчитывается по таким измеряемым величинам, как коэффициент отражения и пропускания, тангенс угла потерь, угол Брюстера, и др.»[5].

В настоящее время существует множество методов (рис. 1) по измерению диэлектрических свойств материалов, однако не все они подходят для решения данной конкретной проблемы [7]. Согласно [8], все эти методы можно разделить на несколько групп: «резонансные, коаксиальные и волноводные, широкополосные, методы, основанные на использовании волн в свободном пространстве, а также неразрушающие методы. Выбор метода измерения зависит от величины диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'$ , диэлектрических потерь  $\varepsilon''$ , диапазона температур и частот, в котором производятся измерения. Измерения параметров цепей и сигналов достигаются с помощью емкостных мостов, Q-метров, измерителей коэффициента стоячей волны, анализаторов спектров частот, измерительных генераторов, измерителей импедансов и т.п.» [8].

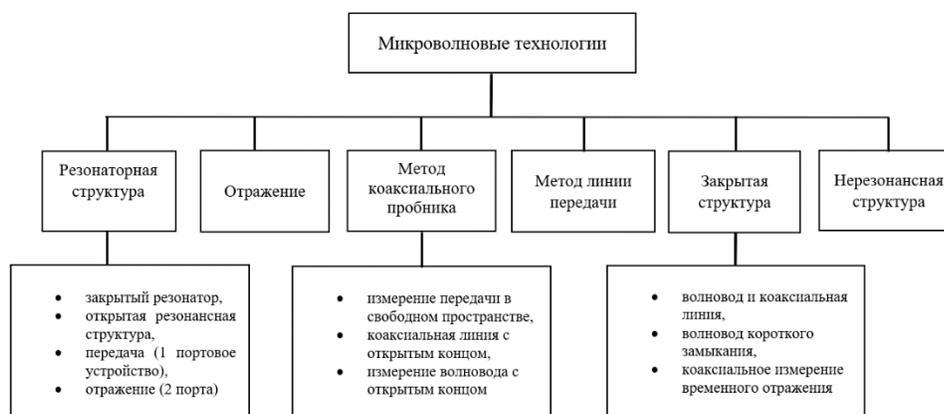


Рисунок 1 – Классификация методов измерения диэлектрической проницаемости

### Конденсаторный метод

«Выбор методов измерений КДП, кроме того, определяется и частотным диапазоном, а также механическими свойствами материала, влияющими на возможности его обработки и достижение необходимой точности измерений. Так, на частотах от 100 Гц до 1 МГц применяют»[9] «конденсаторный метод, являющийся разновидностью резонансных методов» [7]. Данный метод предполагает использование конденсатора, обкладки которого изготавливаются в виде цилиндрической или сферической формы, между которыми помещается исследуемый образец (диэлектрик).

Изменение емкости конденсатора будет зависеть от свойств материала. Данный метод применяется для измерения [12] диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  [8], а «измеряемыми величинами в данном случае могут быть значение импеданса цепи, добротность колебательного контура, образованного измерительным конденсатором и эталонной катушкой индуктивности»[8]. Конденсаторный метод более подробно описан в работе [12], в которой автор рассматривает несколько видов конструкции конденсаторов в зависимости от частотного диапазона и конструкции измерительной установки.

Одной из рассмотренных конструкций (рис. 2) является простейший измерительный конденсатор, обкладки которого изготовлены в виде дисков, диаметры которых

значительно превышали расстояние между ними. «Радиус обкладок конденсатора R определяется с учетом значений длины волны  $\lambda$  и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ :

$$R \leq \frac{0,24\lambda}{2\pi\sqrt{\varepsilon}}. \quad (2)$$

Также необходимо учитывать паразитную емкость, которая складывается из краевой емкости и емкости зазоров между диэлектриком и обкладкой конденсатора». Там же говорится, что «вторым видом конструкции является плоский конденсатор, между обкладками которого в центральной части пространства размещается исследуемый образец. Данный вид позволяет уменьшить влияние паразитных емкостей» [2].

Третья конструкция представляет собой конденсатор, обкладки которого изготовлены в виде сферической или цилиндрической формы, в пространстве между которыми размещается исследуемый образец [8]. Наибольшее распространение получили конденсаторы цилиндрической формы в виду своей простоты изготовления. «Обычно они состоят из трех коаксиальных цилиндров. Наружный и внутренний цилиндры соединены между собой и при подключении к измерительному прибору заземляются. Средний цилиндр для уменьшения краевых эффектов делается на 4–6 мм короче наружного и внутреннего цилиндров» [8].

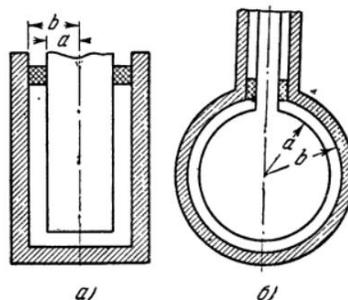


Рисунок 2 – Измерительные конденсаторы цилиндрического (а) и сферического (б) типов, где а и b – радиусы внутренней и внешней обкладок

Там же говорится, что «измерения диэлектрической проницаемости производятся путем измерения изменений емкостей конденсаторов при его заполнении исследуемым образцом. При изготовлении таких конденсаторов необходимо использовать материалы, не взаимодействующие с образцом (посеребренная латунь, золото, платина, титан)».

Паразитные емкости возникают из-за наличия воздушных зазоров между обкладками конденсатора и образцом. Влияние паразитных емкостей необходимо учитывать при вычислении импеданса конденсатора. «Наличие воздушного зазора может привести к неправильным результатам при измерении диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь из-за изменения измеряемого значения емкости» [11]. В работе [12] автором был предложен способ устранения паразитной емкости с помощью нанесения на поверхность образца электродов, которые зависят от свойств исследуемого вещества и размеров образца.

«При изучении проводящих сред, когда имеется прямой контакт образца с измерительными электродами на частотах ниже 104–105 Гц, необходимо учитывать электродную поляризацию. В работах некоторых авторов было показано ее влияние на измеряемое значение действительной части КДП образцов» [9], а также способы устранения и ослабления электродной поляризации. Так, в работе [4] кратко приведены исследования авторов по устранению электродной поляризации.

### Методы линии передачи

Измерение с использованием метода линий передачи заключается в помещении образца в участок волновода или коаксиальной линии и измерение параметров комплексного рассеяния двух портов с помощью векторного анализатора цепей [14].

Метод, согласно [14], «включает измерение отраженного  $S_{11}$  и переданного сигнала  $S_{21}$  (рис. 3). Соответствующие параметры рассеяния тесно связаны с комплексной диэлектрической проницаемостью материала уравнениями. Преобразование  $s$ -параметров в комплексный диэлектрический параметр вычисляется путем решения уравнений с помощью программы.

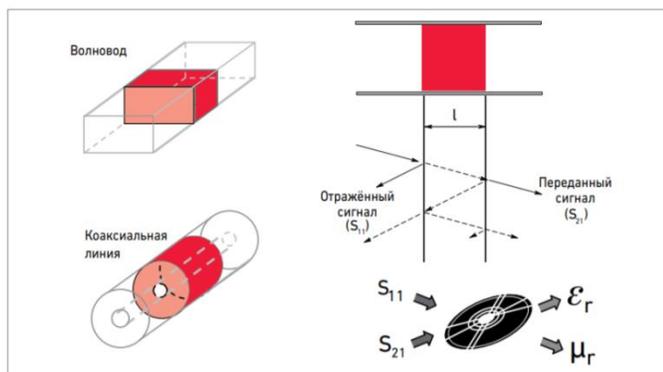


Рисунок 3 – Метод линии передачи/ отражения: волновод и коаксиальная линия

Во многих случаях метод требует подготовки образца [14], например, механической обработки, чтобы образец плотно [14] прилегал к волноводу или коаксиальной линии, которые могут быть изготовлены в прямоугольной или круглой форме.

#### Волноводный метод

В работе [15] была предложена методика измерения КДП минералов, основанная на измерении зависимостей отражательной и пропускательной способностей образцов «от частоты. По этим зависимостям находились действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости» [14] материала. В данной работе измерить пропускательную способность образцов авторам не удалось, так как в исследованиях использовали достаточно толстые образцы, которые поглощали ЭМ-излучение.

Исследования показали, что отражательная способность образцов сильно зависит от частоты: при увеличении содержания рудных минералов в горной породе отражательная способность в зависимости от частоты излучения возрастала от 0,2 для пустой породы до 0,9 для практически чистых рудных пород. На рис. 4 приведен график зависимости отражательной способности от частоты. Более подробно результаты исследования описаны в [17].

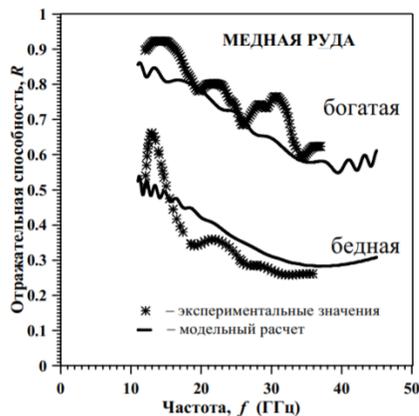


Рисунок 4– Частотные зависимости отражательной способности образцов медной руды [16]

«Неполное совпадение расчетов с экспериментальными результатами связано с тем, что исследуемые образцы медной руды представляют собой сложную дисперсную среду,

в которой имеются границы раздела между минералами, и на этих границах происходит переотражение излучения, которые в модельных расчетах не учитывались» [7,15].

В работе [17] представлены «результаты численного эксперимента при определении КДП-волноводным методом. Расчеты проводились в сантиметровом и миллиметровом диапазонах для диэлектриков с действительной частью диэлектрической проницаемости  $\epsilon_1$ , равной 10, и тангенсами угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  0,1 – 0,2. Ширина воздушного зазора изменялась от 0 до 0,1 мм»[17]. КДП вычислялась с помощью выражения:

$$\epsilon = \frac{\lambda_0^2}{\mu} \left( \frac{1}{\Lambda^2} + \frac{1}{\lambda_{\text{кр}}^2} \right), \quad (3)$$

«где  $\lambda_0$  – длина волны в вакууме,  $\lambda_{\text{кр}}$  – критическая длина волны в волноводе,  $\mu$  – магнитная проницаемость образца,  $\Lambda$  – комплексная величина, определяемая выражением (4)

$$\frac{1}{\Lambda^2} = - \left[ \frac{1}{2\pi l} \ln \left( \frac{1}{P} \right) \right]^2, \quad (4)$$

где  $P$  – коэффициент распространения ЭМ-волны через материал образца в волноводе (рис. 4).

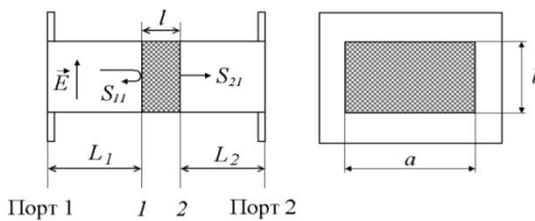


Рисунок 5 – Волноводная секция с исследуемым образцом:  $a \times b$  – поперечные размеры волновода,  $E$  – вектор напряженности электрического поля,  $l$  – длина образца.  $S_{11}$  и  $S_{21}$  коэффициенты отражения и прохождения на границах 1 и 2 образца соответственно»[17]

При наличии воздушного зазора данная работа сводилась к исследованию волновода с частичным заполнением. В результате были получены зависимости диэлектрических параметров от частоты в сантиметровом и миллиметровом диапазоне частот. В сантиметровом диапазоне частот при максимальной величине зазора в 0,1 мм погрешность при определении  $\epsilon_1$  составила 4,5 %, а при определении  $\text{tg}\delta$  – 5,5 %. На рис. 6 приведены графики зависимости  $\epsilon_1$  и  $\text{tg}\delta$  от частоты в сантиметровом диапазоне частот.

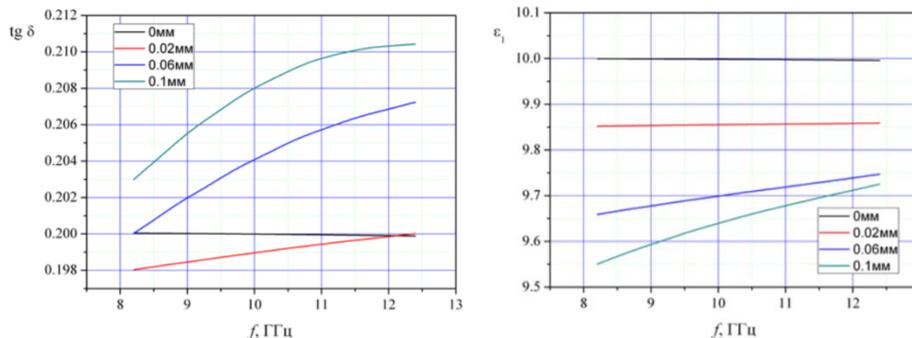


Рисунок 6 – Графики зависимостей  $\text{tg}\delta$  и  $\epsilon$  от частоты в сантиметровом диапазоне частот

В миллиметровом диапазоне погрешность при измерении  $\epsilon_1$  практически не меняется, а  $\text{tg}\delta$  в верхней части диапазона становится больше. Также в данной работе авторы привели способы уменьшения погрешности, связанной с наличием воздушного зазора. На рис. 7 приведены графики зависимости  $\epsilon_1$  и  $\text{tg}\delta$  от частоты в миллиметровом диапазоне частот.

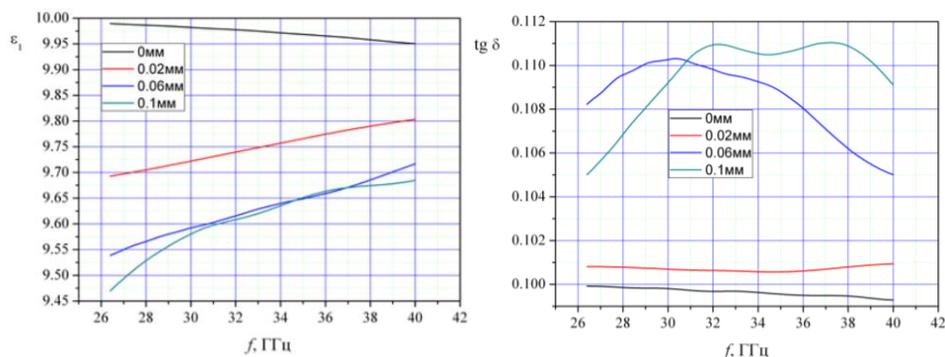


Рисунок 7– Графики зависимостей  $\text{tg}\delta$  и  $\epsilon$  от частоты в миллиметровом диапазоне частот

Показано, что «даже незначительный воздушный зазор между образцом и широкой стенкой волновода приводит к резкому скачку напряженности электрического поля при переходе из материала образца в воздух и сильно влияет на точность определения КДП, которая при определении  $\text{tg}\delta$  достигает 11%. Для уменьшения этой погрешности предлагается заполнять воздушный промежуток электропроводящей пастой. Проведенные расчеты показали, что при заполнении этого промежутка пастой на основе серебра с удельной проводимостью  $\sigma = 2 \cdot 10^6$  См/м максимальная погрешность, связанная с этим фактором, не превышает 0,5 [17] % как для  $\epsilon_1$ , так и для  $\text{tg}\delta$ .

Из-за неприемлемо больших размеров прямоугольные волноводы неудобно использовать на частотах ниже 1 ГГц [9]. Однако волноводы незаменимы на частотах выше 10–15 ГГц, где коаксиальные линии имеют малые размеры поперечного сечения и обладают более высокими потерями»[9].

### Коаксиальные методы

Значительное количество исследований диэлектрических свойств на частотах 50 МГц–18 ГГц осуществляется с применением [9] коаксиальных методов измерения, «основную часть которых составляет коаксиальная ячейка – отрезок коаксиальной линии, заполненный исследуемым веществом и подключенный с помощью согласующих переходных устройств к векторному анализатору цепей или другому измерительному прибору. Преимущества этого метода основаны на небольшом количестве исследуемого образца, необходимом для измерений, а также возможности измерить электрофизические параметры материала в широком диапазоне частот от 0 Гц до СВЧ. Для удержания образца в заданном объеме используются центрирующие шайбы, изготовленные из химически инертного материала с низким значением диэлектрической проницаемости. Коаксиальные линии используются [18] при частотах, когда распространяются поперечные электромагнитные волны»[19].

В работе [20] рассмотрены требования, предъявляемые к «конструкции коаксиальной измерительной ячейки. Во-первых, ячейка должна иметь не менее двух центрирующих шайб для обеспечения удержания образца в заданном месте тракта. Во-вторых, одна из центрирующих шайб должна жестко фиксировать центральную жилу коаксиальной ячейки от продольного перемещения, поскольку необходимо обеспечить правильную геометрию соединительных разъемов. Проще всего этого добиться, используя шайбу, у которой меньший диаметр внутреннего проводника и больший диаметр оболочки, чем соответствующие диаметры участка волновода с воздушным

заполнением. В-третьих, должна сохраняться возможность свободного извлечения второй шайбы [20]. Это необходимо для того, чтобы обеспечить возможность загрузки исследуемого образца в коаксиальную ячейку» [20].

В работе [20] «представлены три варианта конструкции коаксиальных ячеек (рис.8), в которых скомбинированы различные варианты шайб, обеспечивающих одновременное выполнение всех требований к ячейке».

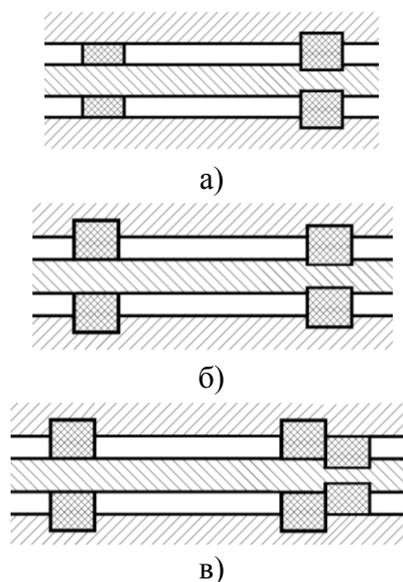


Рисунок 8 – Варианты конструкции коаксиальной ячейки [20]

С «учетом особенностей технической реализации вариант конструкции, представленный на рис. 8в, является более подходящим для измерения жидких материалов, хотя и» [20] «обеспечивает несколько худшее согласование сравнительно с вариантом конструкции рис.8б. При этом для варианта конструкции рис. 8в проще добиться герметичности объема, занимаемого образцом. Если не планируется проведение измерений» [15] жидких материалов, то предпочтение стоит отдать варианту конструкции рис.8.

В работе [17] «приведены данные экспериментальных исследований электромагнитных параметров композиционных материалов на основе углеродных наноструктур. Образцы изготавливались в форме шайб и помещались в коаксиальную ячейку. С помощью векторного анализатора цепей Agilent Technologies E8363B измерялись коэффициенты матрицы рассеяния в диапазоне частот 0,01 – 2 ГГц, затем, используя метод Никольсона-Росса, рассчитывалось значение комплексной диэлектрической проницаемости»[9].

#### **Резонансный метод**

Для определения параметров диэлектрика также применяют «резонансный метод, «являющийся более точным и чувствительным методом. Однако существуют ограничения на частоты и характеристики потерь материалов, которые могут быть измерены этим методом. Существует множество типов резонансных методов, таких как входящие полости, резонаторы с разделенным цилиндром, объемные резонаторы, резонаторы» [14] Фабри-Перо и т. д. (рис. [18] 9) , однако наиболее часто используются два типа резонансных измерений.

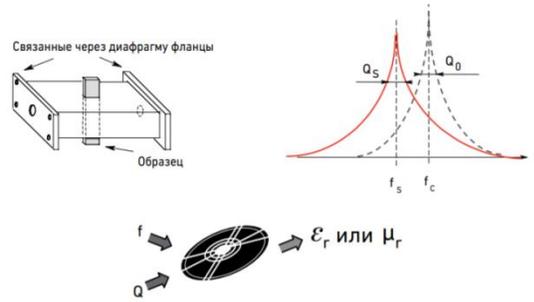


Рисунок 9 – Измерение в объёмном резонаторе

«Диэлектрическая проницаемость определяется по следующим формулам:

$$\varepsilon_r' = \frac{V_c(f_c - f_s)}{2V_s f_s} + 1, \quad (5)$$

$$\varepsilon_r'' = \frac{V_c}{4V_s} \left( \frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_c} \right), \quad (6)$$

где  $V$  – объем,  $Q$  – добротность резонатора, индекс  $c$  – для пустого резонатора, индекс  $s$  – для резонатора с образцом.

К первой группе относят методы, основанные на возбуждении резонанса непосредственно в измеряемом образце, а ко второй – на внесении образцом возмущения в поле опорного резонатора» [17]. В работе [5] «автор рассматривает прямоугольный объемный резонатор, в котором исследуется жидкость в кювете,  $\varepsilon'$  и  $\text{tg}\delta$  жидкости определяются по измеренным значениям резонансной длины волны и добротности резонатора при отсутствии и наличии исследуемой жидкости в кювете. Резонаторы без диэлектрика и частично заполненные диэлектриком изображены на рис.10» [5].

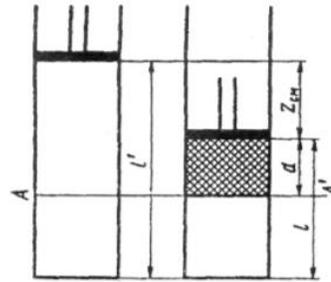


Рисунок 10 – Схемы полого резонатора без диэлектрика и частично заполненного диэлектриком

«Диэлектрическая проницаемость определяется из выражения:

$$\varepsilon' = \frac{1 + (\lambda_c a / 2\pi d)^2}{1 + (\lambda_c / \lambda_p)^2}, \quad (7)$$

где  $\lambda_p$  – резонансная длина волны резонатора;  $\lambda_c$  – критическая длина волны резонатора [5];  $d$  – высота столба жидкости.

Также в данной работе автор «рассматривает цилиндрический резонатор, в котором «кювета с исследуемой жидкостью устанавливается на оси резонатора; в этом случае кювета должна иметь цилиндрическую форму, тонкие стенки и малый диаметр». Все расчетные формулы, методы измерения и анализ ошибок даны в работе [20]. Погрешность» [8] этого метода составляет порядка 1% для  $\varepsilon'$  и 3% для  $\varepsilon''$ . «Основными источниками погрешности являются неточности измерений [17], погрешности расчета, а для методов первой группы на погрешность влияет неточность определения размеров

образцов. При использовании первой группы методов необходимо, чтобы образцы были простой формы (прямоугольник или цилиндр), а также имели заданные размеры. Вторая же группа методов не предъявляет особых требований к образцам [17].

Достоинством резонаторных методов являются простота измерений, малые габариты установки, приемлемые погрешности  $\epsilon'$  порядка 1,5%, а  $\epsilon''$  3–5%, малое количество жидкости, необходимое для измерения. К недостаткам этих методов можно отнести механическую трудность изготовления резонаторов с большой добротностью, необходимость обеспечения большой стабильности генератора колебаний и невозможность измерения  $\epsilon'$  и  $\text{tg}\delta$  жидкостей с большими потерями»[5].

### Микрополосковые линии

Для определения диэлектрических свойств различных веществ, помимо волноводов и коаксиальных ячеек, применяются [9] микрополосковые линии (МПЛ). В работе [22] авторы исследовали диэлектрические свойства жидких кристаллов в области частот 0,1 ГГц на стыке метрового и дециметрового диапазонов волн с помощью микрополосковых резонаторов, которые совмещают в себе сравнительно высокую добротность и миниатюрность. В данной работе авторы рассматривали некоторые конструкции чувствительных элементов на основе микрополосковых структур, позволяющих измерять диэлектрическую проницаемость материалов на сверхвысоких частотах (СВЧ).

В работе [22] использование микрополосковых структур для исследования диэлектрической проницаемости проводилось на трех сконструированных датчиках, показанных на рис.11.

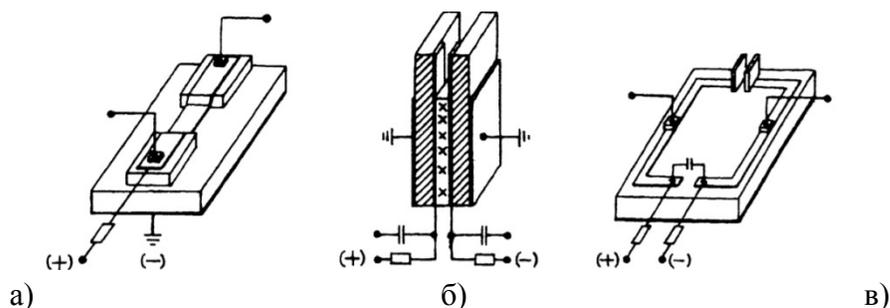


Рисунок 11– Конструкции микрополосковых СВЧ- датчиков

«Конструкция первого СВЧ-датчика состоит из двух отрезков микрополосковых линий, соединенных между собой отрезком несимметричной воздушной полосковой линии» [23], в котором и размещается исследуемый образец. Второй вид датчика выполнен на основе связанных «микрополосковых линий, которые склеивались пластмассовым компаундом так, что взаимодействующие полосы резонаторов располагались параллельно друг другу внутри конструкции, а экраны МПЛ – снаружи, в верхней части конструкции был оставлен промежуток» [24], куда и заливался исследуемый образец [22]. Третий вид датчика выполнен на основе «кольцевого резонатора», полоска которого «свернута в виде квадрата. В этом датчике образец заливался в зазор между обкладками плоского конденсатора, изготовленными из тонкой латуни и припаянными к концам полоски резонатора» [24]. Авторами были построены АЧХ для всех видов датчиков (рис. 12).

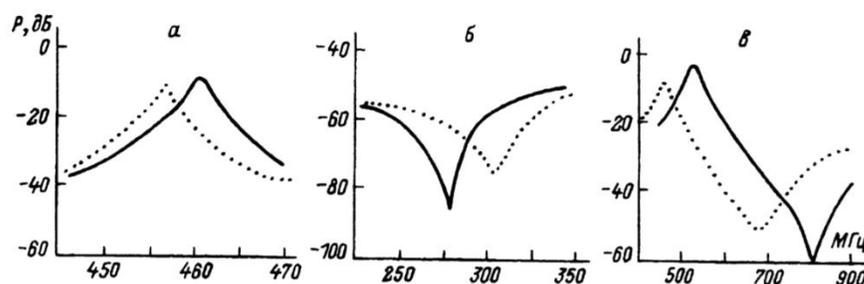


Рисунок 12 – Амплитудно-частотные характеристики микрополосковых СВЧ-датчиков

В ходе экспериментальной проверки авторами было показано, что наибольшей чувствительностью обладает датчик мостового типа на связанных микрополосковых линиях и датчик на основе «кольцевого» резонатора. Относительная чувствительность исследуемых датчиков лежит в пределах  $10^{-3}$ - $10^{-4}$ , что позволяет фиксировать небольшие изменения диэлектрической проницаемости жидких кристаллов на СВЧ, связанных с изменением ориентации молекул в образце жидкого кристалла.

В «дальнейшем авторами была усовершенствована конструкция СВЧ-датчика, в которой микрополосковый измерительный резонатор включен в качестве задающего контура в автогенераторную СВЧ-схему. Задающим контуром является микрополосковый резонатор «кольцевого» типа с вертикальными измерительными позолоченными пластинами. В качестве исследуемых образцов выступили два типичных нематогена: 4-н-пентил-4-цианобифенил (5ЦБФ) и 4-метоксибензилиден-4-бутиланилин (МББА). Методика проведения эксперимента заключается в следующем: в зазор измерительных пластин СВЧ- датчика автогенератора помещался жидкий кристалл и выдерживался в течение часа для достижения равновесия. Затем для каждого образца при наложении магнитного поля снимались зависимости относительного изменения частоты и амплитуды. Аналогичные зависимости были сняты при приложении к измерительным пластинам датчика электрического напряжения. Также было исследовано совместное воздействие магнитного и электрического полей на жидкие кристаллы. СВЧ-датчик размещался в миниатюрном термостате, который располагался между полюсами электромагнита. Корпус автогенератора мог вращаться между полюсами магнита так, что направление магнитного поля могло быть как параллельно, так и перпендикулярно сверхвысокочастотному электрическому полю» [9]. Также в работе [9] автор приводит краткое исследование нескольких работ, в которых предложены различные конструкции для расчетов КДП, использующие микрополосковые линии.

#### Метод коаксиального пробника

Рассмотренные выше методы требуют определенной подготовки образцов для исследования КДП, что может негативно сказываться при расчетах, так как при подготовке образцов нарушается их естественная структура. В таких случаях используют методы, неразрушающие контроля.

Наиболее современным неразрушающим методом, «использующим коаксиальную линию передачи, является метод коаксиального пробника. Метод коаксиального зонда с открытым концом [8] в течение многих лет использовался в качестве метода неразрушающего контроля, так как исследование образцов происходит путем погружения коаксиального пробника в жидкость или касания пробника плоской поверхности материала. Разомкнутый коаксиальный пробник является срезом коаксиальной линии передачи. Структура полей на конце пробника искажается, как только они входят в контакт с испытуемым материалом, [25] и для определения диэлектрических параметров измеряется отраженный сигнал [26] с помощью векторного анализатора цепей» (рис. 13).

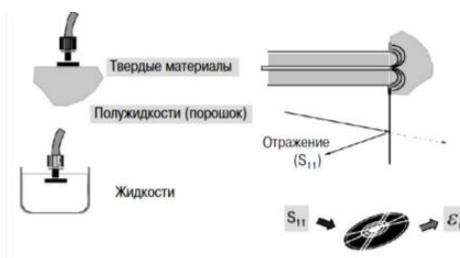


Рисунок 13 – Метод коаксиального пробника

С помощью данного метода в работе [16] авторы «измеряли КДП растворов поваренной соли концентрацией 0,5 моль/л и 1 моль/л. Измерения проводились [9] в диапазоне частот от 1 до 20 ГГц с использованием векторного анализатора цепей HP 8510. Для интерпретации результатов авторами были исследованы конденсаторная модель, антенная модель, модель виртуальной линии и модель с использованием рациональных функций. По итогам тестирования наилучшие результаты дает модель виртуальных линий. Так, для исследуемых растворов погрешность по  $\epsilon'$  составляет 5–10 %, а по  $\epsilon''$  – 2–5 % для раствора 0,5 моль/л и 1–5 % для раствора 1 моль/л [9].

При использовании метода коаксиального пробника к образцу предъявляются определенные требования, а именно:

- толщина образца более половины длины волны;
- немагнитный;
- изотропный и однородный; плоская поверхность;
- отсутствие воздушных зазоров»[26].

«Основными источниками погрешностей при использовании данного метода является неточность измерения величины отраженного сигнала  $S_{11}$ , нестабильность кабеля, наличие воздушных зазоров, а также неточность измерения толщины образца» [26]. Использование коаксиального пробника для определения КДП требует хорошего контакта с исследуемым образцом», как говорится в [26].

#### Метод свободного пространства

«Одним из существующих методов для измерения диэлектрической проницаемости, отвечающей требованиям для неразрушающего контроля, является измерение коэффициента передачи в свободном пространстве с использованием антенн [9] для фокусировки энергии на образце или пропускании энергии через него» [9] (рис. 14).



Рисунок 14 – Метод свободного пространства

«Сущность метода исследования диэлектриков в свободном пространстве (метода свободного пространства) состоит в сравнении параметров электромагнитной волны, прошедшей через диэлектрический образец или им отраженной, с параметрами волны, проходящей то же пространство без образца, либо с волной, отраженной от идеального отражателя» [26, 27]. Кроме того, «при использовании данного метода диэлектрический образец располагается в свободном пространстве, не имея механического контакта с какими-либо узлами измерительной аппаратуры, кроме элементов крепления образца. Элементы крепления не оказывают существенного влияния на результаты измерений» [27]. Сравнивая параметры отраженной и прошедшей волн, можно вычислить собственные параметры диэлектрика [28].

«Различные варианты экспериментальной установки исследованы в работе [29]. «В работе рассмотрены три системы, используемые для измерения коэффициента передачи в свободном пространстве.

1. Система с рупорными антеннами (состоит из двух антенн, расположенных на противоположных сторонах от исследуемого объекта).

2. Система с линзами (состоит из двух рупорных антенн и двояковыпуклой линзы, расположенной между передающей антенной и исследуемым объектом).

3. Система с антенной решеткой (состоит из антенной решетки и приемной рупорной антенны). Авторами протестированы предложенные системы с целью выявления наилучшего варианта для промышленного применения. Был измерен коэффициент передачи и рассчитана КДП семи образцов (пена ПВХ, фторопласт, акрил и др.), размер которых не превышал 10 см. Измерения проводились» [9] в диапазоне частот от 10 до 12 ГГц. Полученные значения КДП сравнивались с данными, опубликованными в литературе. Анализ полученных данных позволил сделать вывод о том, что система с антенной решеткой имеет ряд преимуществ по сравнению с двумя другими системами [3, 8].

В работе [20] автор рассматривает два варианта поляризационного метода определения КДП исследуемого образца. Первый вариант заключается в том, что «если на поверхность раздела двух сред падает электромагнитная волна с круговой или эллиптической поляризацией, то отраженная волна меняет поляризационную структуру. Комплексный коэффициент поляризации отраженной волны  $p$  равен отношению коэффициентов Френеля для параллельно и перпендикулярно поляризованной волны:

$$p = \frac{r_{\parallel}}{r_{\perp}}, \quad (8)$$

где  $r_{\parallel}$  и  $r_{\perp}$  – коэффициенты Френеля для параллельно и перпендикулярно поляризованной волны.

Таким образом, экспериментальное нахождение  $p$ , например, по амплитудам вертикальной и горизонтальной составляющих поля и углу ориентации поляризационного эллипса также дает возможность вычислить  $\varepsilon$ .

Второй вариант основан на измерении угла Брюстера и отношения модулей коэффициентов отражения параллельно и перпендикулярно поляризованных волн [22]. Основная ошибка измерений по углу Брюстера и поляризационными методами обусловлена тем, что теория этих методов учитывает отражение волн только от границы раздела двух сред и предполагает отсутствие внутренних многократных отражений, вызываемых теневой поверхностью образца» [26].

«Комплексные коэффициенты прохождения параллельно и перпендикулярно поляризованных волн через границу раздела «свободное пространство – диэлектрик», согласно формулам Френеля, записываются в виде:

$$\hat{t}_{\parallel} = \frac{2\sqrt{\varepsilon} \cos \varphi}{\varepsilon \cos \varphi + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi}}, \quad (9) \quad \hat{t}_{\perp} = \frac{2 \cos \varphi}{\cos \varphi + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi}} \quad (10)$$

где  $\hat{t}_{\parallel}$  и  $\hat{t}_{\perp}$  – комплексные коэффициенты прохождения параллельно и перпендикулярно поляризованных волн,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $\varphi$  – угол падения ЭМ- волны.

Данные выражения позволяют вычислить комплексный коэффициент прохождения волны через плоскопараллельную пластину определенной толщины, по значению которого затем можно найти и  $\varepsilon$ » [30].

Образцы «при исследовании должны быть большими, плоскими, с параллельными сторонами, а также однородными» – [26] – «Основные источники погрешностей:

– неточность измерения величины  $S_{11}$  и  $S_{12}$ ;

– погрешность расчета;

– нарушение параллельности плоскостей, перпендикулярных к направлению распространения волны;

- низкое качество обработки поверхности плоскостей, перпендикулярных к направлению распространения волны;
- неточность измерения толщины образца»[26].

«Метод свободного пространства может быть применен: для измерений в миллиметровом и сантиметровом диапазонах, когда другие (например, резонаторные или волноводные) методы становятся неприемлемыми; при исследовании параметров однородных, неоднородных и слоистых листовых материалов как в условиях лаборатории, так и в производственных условиях, когда изготовление образцов специальной формы из листового материала нецелесообразно; при исследовании пленочных материалов; при исследовании готовых изделий из диэлектриков (например, обтекателей антенн, антенных [30] окон и других радиопрозрачных оболочек), которые нельзя разрушать для изготовления из них образцов в целях проведения измерений. Наконец, метод свободного пространства может использоваться при исследовании диэлектриков в процессе воздействия на них каких-либо внешних факторов: радиации, механических усилий, тепловых потоков, плазменных сред, при которых любая другая измерительная аппаратура, контактирующая с диэлектрическими образцами, становится либо помехой для действия этих факторов, либо сама разрушается под их воздействием» [30].

### **Выводы**

В данной работе были проанализированы методы измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов. Было выяснено, что «на частотах от 100 Гц до 1 МГц используют конденсаторный метод, заключающийся в использовании конденсатора, между обкладками которого размещается исследуемый образец. Изменение емкости конденсатора будет зависеть от свойств материала» [7]. Однако в использовании данного метода для вычисления диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  большую погрешность вносят воздушные зазоры, возникающие между обкладками конденсатора и образцом.

Метод линии передачи заключается в том, что исследуемый образец размещают в отрезке коаксиальной линии или волновода. При этом сам образец подвергается механической обработке, что может негативно сказываться при измерениях, так как при обработке изменяется структура образца. Измерения  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  основываются на измерении отраженного и прошедшего сигналов.

Прямоугольные и круглые волноводы целесообразно применять для измерения КДП материалов в диапазоне частот выше 1 ГГц, что обусловлено значительными геометрическими размерами волноводов на более низких частотах. Как отмечается в [2], точность измерения диэлектрической проницаемости коаксиальным и волноводными методами может составлять 1–3%, но коаксиальный метод может быть неудобен для измерения твердых материалов, так как не всегда обеспечивается достаточный контакт исследуемого материала с внутренним и внешними проводниками ячейки.

Методы с использованием объемного резонатора можно разделить на две группы. К первой группе «относят методы, основанные на возбуждении резонанса непосредственно в измеряемом образце, а ко второй – на внесении образцом возмущения в поле опорного резонатора. В обоих методах измеряются параметры  $S_{11}$  и/или  $S_{21}$ . На основании измеренных величин рассчитывают требуемые характеристики диэлектрического материала» [6].

Для определения диэлектрических свойств различных веществ, помимо волноводов и коаксиальных ячеек, применяются полосовые линии. Методы с использованием микрополосковых резонаторов позволяют измерять КДП веществ при весьма малых его объемах, однако они не обладают достаточной широкополосностью.

Рассмотренные выше методы обладают существенным недостатком – «из-за нарушения естественной структуры материала при подготовке образцов данные,

полученные в результате лабораторных исследований, могут отличаться от значений КДП в условиях естественного залегания горных пород» [7].

Методы неразрушающего контроля используют в тех случаях, когда обработка образца нежелательна или образец имеет очень большие размеры. Метод коаксиального пробника использует коаксиальную линию с открытым концом и заключается в исследовании образцов путём погружения коаксиального пробника в жидкость или касанием пробника поверхности твердого материала. И для определения диэлектрических параметров измеряется отражённый сигнал. При соприкосновении пробника и образца необходимо, чтобы они плотно прилегали друг другу, в противном случае могут возникнуть воздушные зазоры, что негативно сказывается при измерении.

«Сущность метода исследования диэлектриков в свободном пространстве (метода свободного пространства) состоит в сравнении параметров электромагнитной волны, прошедшей через диэлектрический образец или им отраженной, с параметрами волны, проходящей то же пространство без образца, либо с волной, отраженной от идеального отражателя» [14, 20].

Метод свободного пространства является более подходящим методом по следующим причинам:

- не требуется обработка материалов;
- размеры образцов могут быть достаточно большими;
- можно использовать при высоких температурах;
- отсутствие механического контакта с образцом;
- возможность измерения магнитных материалов.

Таким образом, выбор того или иного метода определения электрофизических параметров горных пород является важной задачей, так как данные о диэлектрических характеристиках природных минералов могут быть полезны в таких областях, как геология, сейсмология, горнодобывающая промышленность, и т.п. Поэтому, проанализировав все существующие методы (табл. 2), мы рекомендуем метод свободного пространства как наиболее подходящий метод измерения, который позволит получить наиболее достоверные и полные результаты.

Таблица 2 – Методы измерения диэлектрической проницаемости

Название метода	Краткое описание	Рекомендуемый материал	Частотный диапазон	Преимущества	Недостатки
Конденсаторный метод	Материал должен быть помещен между двумя электродами, чтобы сформировать конденсатор	Материал, способный формироваться в виде плоского гладкого листа	< 100 МГц	Высокая точность, недорогой	Ограниченный частотный диапазон; толщина материала не превышает 10 мм
Схема с сосредоточенными параметрами	Образец является частью изолятора в цепи со сосредоточенными параметрами	Все материалы, кроме газов	< 100 МГц	Могут быть измерены жидкие и твердые материалы	Ограниченный диапазон частот; не подходит для материалов с очень низкими потерями
Коаксиальный зонд	Отрезанная коаксиальная линия образует плоскую границу, контактирующую с исследуемым веществом. Для измерения отражения необходим	Жидкости и полутвердые вещества	200 МГц–20 ГГц, даже >100 ГГц	Прост в использовании, не разрушает некоторые материалы, не требует предварительной подготовки	Ограниченная точность ( $\pm 5\%$ ). Разрешение с низкими потерями; большие образцы и твердые тела должны иметь плоскую поверхность

	векторный анализатор				
Метод линии передачи	Образец заполняет поперечное сечение замкнутой линии передачи, вызывая изменение импеданса	Жидкости и твердые вещества	< 100 МГц	Более точный и чувствительный, чем зондовый метод	Меньшая точность, чем у резонаторного метода, подготовка материала сложна и требует много времени
Объемный резонатор	Образец вводится в резонатор (высокодобротная резонансная структура), что влияет на центральную частоту и добротность резонатора	Твердые тела	1 МГц–100 ГГц	Простая подготовка материала, адаптируемая к широкому диапазону температур	Сложный анализ
Метод свободного пространства	Используются антенны для направления СВЧ-излучения, прошедший или отраженный материал. Векторный анализатор цепей измеряет коэффициенты отражения и пропускания твердых тел	Твердые тела	1 МГц–100 ГГц	Неразрушающий метод можно использовать при высоких температурах	Требуется большой плоский, тонкий, параллельный образец и специальная калибровка

### Литература

1. Волноводный метод для измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов в сантиметровом и миллиметровом диапазонах / М. П. Пархоменко, Д. С. Каленов, И. С. Еремин [и др.] // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2019. – № 1(540). – С. 20–38.
2. Анищенко, Ю. В. Численное решение и компьютерная реализация прямой и обратной задач уравнения геоэлектрики / Ю. В. Анищенко, А. Д. Сатыбаев // Проблемы автоматизации и управления. – 2020. – № 2(39). – С. 72–82.
3. Устройства для информационно-управляющей системы по мониторингу масляных силовых трансформаторов / Г. Н. Ниязова, К. Сатаркулов, Т. К. Кабаев, Р. А. Мырзаканова // Проблемы автоматизации и управления. – 2020. – № 2(39). – С. 43–50.
4. Григорьев, А. Д. Новый волноводный метод измерения параметров диэлектриков / А. Д. Григорьев // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2018. – № 5. – С. 33–38. – DOI 10.32603/1993-8985-2018-21-5-33-38.

5. <http://netess.ru/3knigi/1223442-1-servis-virtualnih-konferenciya-pax-grid-sovremennoe-sostoyanie-mineralogii-mezhdunarodnaya-internet-konferenciya-kazan-fev.php#2> (Дата обращения: 3.10.21)
6. [https://studopedia.ru/19\\_326977\\_dielektricheskaya-pronitsaemost-mineralov-i-gornih-porod.html](https://studopedia.ru/19_326977_dielektricheskaya-pronitsaemost-mineralov-i-gornih-porod.html) (Дата обращения: 3.10.21)
7. Бахтерев, В. В. Первые результаты использования микроволнового излучения для изучения хромитовых руд / В. В. Бахтерев // Уральский геофизический вестник. – 2013. – № 2(22). – С. 13–17.
8. [http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/747/21747/4960?p\\_page=6](http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/747/21747/4960?p_page=6) (Дата обращения: 3.10.21)
9. <https://dlib.rsl.ru/01008770216> (Дата обращения: 3.10.21)
10. Иноземцев М. А. Обзор методов измерения диэлектрической проницаемости горных пород / М. А. Иноземцев // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2020. – № 1-1. – С. 279–281.
11. [https://knowledge.allbest.ru/geology/3c0a65625b2ac68a5d53b88421206d36\\_0.html](https://knowledge.allbest.ru/geology/3c0a65625b2ac68a5d53b88421206d36_0.html) (Дата обращения: 3.10.21)
12. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – М.: Изд-во физ.-мат. лит. – 1963. – 404 с.
13. Импедансная спектроскопия: теория и применение : Рекомендовано методическим советом УрФУ для студентов, обучающихся по программе специалитета и магистратуры по направлениям подготовки 04.05.01 «Фундаментальная и прикладная химия», 04.04.01 «Химия», 04.04.02 «Химия, физика и механика материалов» / Ю. В. Емельянова, М. В. Морозова, З. А. Михайловская, Е. С. Буянова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург : Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2017. – 156 с. – ISBN 978-5-7996-2067-7.
14. <http://docplayer.net/21632715-Measurement-of-dielectric-material-properties.html> (Дата обращения: 3.10.21)
15. Моделирование диэлектрических свойств горных пород, содержащих рудные минералы / О. Н. Полякова, В. В. Тихонов, А. Л. Дзарданов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2009. – Т. 6. – № 2. – С. 62–65.
16. <http://www.iki.rssi.ru/books/2011tikhonov.pdf#2> (Дата обращения: 3.10.21)
17. Волноводный метод измерений электромагнитных параметров материалов в СВЧ диапазоне и оценка погрешности измерений / М. П. Пархоменко, Д. С. Каленов, И. С. Еремин [и др.] // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – № 9. – С. 9. – DOI 10.30898/1684-1719.2018.9.6.
18. [http://izvestia.asu.ru/media/files/issue/17/articles/ru/\\_p56-60.pdf](http://izvestia.asu.ru/media/files/issue/17/articles/ru/_p56-60.pdf) (Дата обращения: 3.10.21)
19. <http://diss.seluk.ru/m-fizika/30001193-2-gusev-osnovi-dielektricheskoy-spektroskopii-uchebnoe-posobie-kazan-2008-predislovie-metod-dielektricheskikh-izmereniy-vpervie-kaza.php> (Дата обращения: 3.10.21)
20. Молостов, И. П. Коаксиальная измерительная ячейка для широкополосных измерений диэлектрической проницаемости / И. П. Молостов, В. В. Щербинин // Известия Алтайского государственного университета. – 2015. – № 1-2(85). – С. 56-60. – DOI 10.14258/izvasu(2015)1.2-09.
21. Кулешов, Г. Е. Диэлектрическая проницаемость и электропроводность композиционных материалов на основе углеродных наноструктур / Г. Е. Кулешов,

- В. И. Суслиев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 1(31). – С. 84–87.
22. Berube, D. A comparative study of four open-ended coaxial probe models for permittivity measurement of lossy dielectric/biological material at microwave frequencies / D. Berube, F. M. Ghannouchi, P. Savard // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1996. – V. 44, № 10. – P. 1928–1934.
23. Roussi G., Boule P., J. Chim. Phys., 64, 529 (1965)
24. Беляев, Б. А. Применение микрополосковых резонаторов для исследования диэлектрических свойств жидких кристаллов на СВЧ / Б. А. Беляев, Н. А. Дрокин, В. Н. Шепов // Журнал технической физики. – 1995. – Т. 65. – № 2. – С. 189–197.
25. [https://kpfu.ru/portal/docs/F\\_1534325453/Bakalavrskaya\\_Kljukin.pdf](https://kpfu.ru/portal/docs/F_1534325453/Bakalavrskaya_Kljukin.pdf) (Дата обращения: 3.10.21)
26. Диденко Ю.В., Молчанов В.И., Пашков В.М., Татарчук Д.Д., Шмыгин Д.А. СВЧ методы измерения параметров диэлектрических материалов на основе составного диэлектрического резонатора // ЕЛЕКТРОНИКА ТА ЗВ'ЯЗОК . – Т. 19.– № 6. – 2014. – С. 14–20.
27. Доценко, О. А. Использование нерегулярных микрополосковых резонаторов для измерения температурных зависимостей магнитной проницаемости порошков ферритов : специальность 01.04.03 "Радиофизика" : Дис.... на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Доценко Ольга Александровна. – Томск, 2007. – 115 с.
28. <http://bananabooks.net/book/1177-proektirovanie-radiovolnovyx-svch-priborov-nerazrushayushhego-kontrolya-materialov-malkov-na/17-31-izmeryaemye-parametry-i-princip-izmereniya.html> (Дата обращения: 3.10.21)
29. Дрокин, Н. А. Микрополосковые резонаторы и их применение для исследований диэлектрических свойств жидких кристаллов: специальность 01.04.01 "Приборы и методы экспериментальной физики»: Дис.... на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Дрокин Николай Александрович. – Красноярск, 2007. – 304 с.
30. Мищенко С.В., Малков Н.А. Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля материала. – Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 2003. –128 с.
31. <http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/747/21747/4960> (Дата обращения: 8.10.21)
32. Bogosanovich M. [et all]. A comparison of systems for non-contact and non-destructive natural product inspection // Fifth International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances New Zealand. – 2003. – P. 15-23.
33. [https://knowledge.allbest.ru/radio/3c0b65635b3ad78b4c43b89521316c37\\_0.html](https://knowledge.allbest.ru/radio/3c0b65635b3ad78b4c43b89521316c37_0.html) (Дата обращения: 15.10.21)

УДК 551.594

**И.В. Брякин, д.т.н., профессор**

**Н.Г. Мамытов, аспирант**

*Институт машиноведения и автоматики НАН КР*

## АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ЕЭМП ELF-VLF-ДИАПАЗОНОВ

Рассматриваются прикладные вопросы разведочной геофизики. Анализируются свойства и особенности возникновения и распространения естественных электромагнитных полей (ЕЭМП) в ELF-VLF-диапазонах. Обосновывается возможность применения ЕЭМП в ELF-VLF-диапазонах в качестве высокочувствительного носителя информации о земных и космических процессах.

**Ключевые слова:** атмосфера, атмосферный разряд, atmospheric, диэлектрическая проницаемость, грозовое облако, ЕЭМП, ELF-VLF-диапазон, магнитная восприимчивость, магнитная компонента, литосфера, поверхностный импеданс, spheric, tweek, удельное электрическое сопротивление, частотный диапазон, эндовибратор, электрическая компонента, электромагнитная волна, CG- и IC-молнии.

### Введение

Известно, что различные геофизические методы исследований, в частности частотные электромагнитные зондирования, используют в качестве зондирующего поля радиоволновое излучение электрического или магнитного дипольных источников, которые располагаются на плоской границе раздела между двумя однородными полупространствами. Одно из полупространств имеет бесконечно высокое сопротивление и представляет собой воздушную среду, а другое из полупространств является проводящим поверхностным слоем земли, образующим в свою очередь нижнюю стенку волновода «Земля–ионосфера» [1–3].

В задачах распространения и возбуждения радиоволн основным параметром, характеризующим электрические свойства нижней стенки волновода «Земля–ионосфера», является поверхностный импеданс  $\delta$ , учитывающий совокупное воздействие слоистой земной коры на электромагнитное поле [1]:

$$\delta = E_{\tau} / (H_{\tau} \times Z_0),$$

где  $E_{\tau}$  и  $H_{\tau}$  – одновременно регистрируемые горизонтальные соответственно электрическая и магнитная компоненты ЕЭМП;  $Z_0 = 377$  Ом – характеристический импеданс свободного пространства.

В последнее время особый интерес у соответствующих специалистов вызывают методы зондирования, основанные на использовании естественных электромагнитных полей (ЕЭМП) в КНЧ–ОНЧ (ELF-VLF)-диапазонах. Главной особенностью электромагнитных полей указанных частотных диапазонов является их возможность распространения в волноводе Земля–ионосфера на большие расстояния с очень малым затуханием, составляющим несколько децибел на тысячу километров, и проникновения на большие глубины в землю и воду.

Следует отметить, что для решения многих задач разведочной геофизики и электромагнитного мониторинга сейсмотектонических процессов, а также для определения особенностей структуры самой земной коры необходимо знание прежде всего ее электрических характеристик в КНЧ–ОНЧ-диапазонах.

Широкое применение в качестве контролируемого источника КНЧ–ОНЧ-диапазонов ЕЭМП позволит открыть новые возможности не только для изучения электрических характеристик земной коры, но и для обнаружения погруженных

подводных объектов различного назначения, т.к. электромагнитные волны указанного диапазона также могут проникать на большие глубины в соленой или проводящей воде.

Поэтому разработки, направленные на повышение достоверности и эффективности методов зондирования, основанные на взаимодействии ЕЭМП с нижней границей волновода Земля-ионосфера, были и остаются актуальными, не теряющими свою прикладную значимость.

Для оценки возможностей более эффективного применения ЕЭМП в качестве активизирующего физического поля для задач электромагнитного зондирования необходимо знать условия возбуждения и распространения КНЧ–ОНЧ электромагнитных волн, понимать физическую природу ЕЭМП в целом, его особенности и свойства, что в свою очередь требует проведение соответствующей систематизации и углубленного феноменологического анализа всех этих факторов.

### Свойства эндовибратора

Электромагнитные поля, наблюдаемые на Земле, порождаются различными причинами как земного, так и космического происхождения. Известно, что космические лучи представляют собой ионизирующее излучение, соответствующим образом воздействующее на верхний слой атмосферы. Ионизированный подобным образом верхний слой атмосферы фактически является ионосферой, которая при анализе процессов распространения электромагнитных волн в атмосфере Земли становится определяющим фактором. Высокая ионизация верхнего слоя атмосферы определяет ее способность отражать волны определенной частоты, т.е. не пропускать часть излучения из космоса и отражать часть излучения с Земли [4].

Фактически человек и окружающий его материальный мир объективно существуют в условиях резонатора Земля–ионосфера, т.е. в своеобразной электродинамической системе. В таком резонаторе (эндовибраторе) распространяются электромагнитные волны широкого частотного диапазона (рис.1) [4, 5].

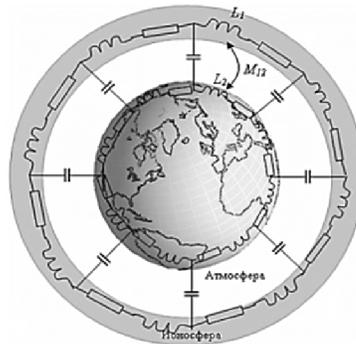


Рисунок 1 – Модель эндовибратора

Для анализа протекающих в атмосфере Земли электромагнитных процессов обычно используют модель базового элемента глобальной атмосферной электрической цепи в виде элементарной эквивалентной электрической ячейки (рис. 2), где  $L_1$ ,  $R_1$  и  $L_2$ ,  $R_2$  – компоненты электрической ячейки, отражающие процессы соответственно в коре Земли и ионосфере;  $M_{12}$  – взаимная индуктивность между компонентами  $L_1$  и  $L_2$ ;  $R_a$  и  $C_a$  – компоненты электрической ячейки, отражающие процессы в самой атмосфере [6].

В целом колебания электромагнитного поля, обусловленные резонансными свойствами земного шара, носят импульсный характер, и в их спектре одновременно представлены колебания, соответствующие набору резонансных частот эндовибратора.

Подобные электромагнитные волновые процессы вблизи поверхности Земли инициируют соответствующий колебательный обмен между энергией электрического поля, локализованного в атмосфере Земли, и энергией магнитного поля, обусловленного электрическими токами в ионосфере и проводящих слоях коры Земли. Такие колебательные процессы «фактически связаны с периодическим обменом энергией между

реактивными  $L$  и  $C$  элементами эндовибратора, что в свою очередь и приводит к резонансным явлениям, вызывающим локальные перенапряжения как в атмосфере, так и в коре Земли, которые и приводят к различного» [6] рода атмосферным разрядам.

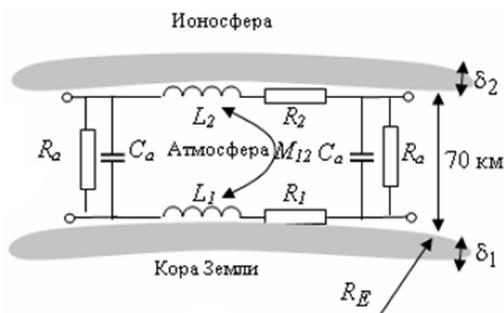


Рисунок 2 – Базовый элемент глобальной литосферно-атмосферно-ионосферной системы

Если рассматривать подобный эндовибратор в качестве грозового электрического генератора, то его режимы функционирования в основном будут зависеть от электрических характеристик грозового облака, которые «в свою очередь определяются пространственно-временной динамикой зарядов и токов, которая однозначно связана с электрическим полем вне облака. Наблюдаемыми вне облака его проявлениями электрической активности являются электрические разряды, формирующие импульсную компоненту возмущений, и относительно регулярные вариации электрического поля, обусловленные распределением и динамикой электрического заряда в облаке» [7].

Следует подчеркнуть, что первопричиной любых электрических разрядов в атмосфере является образование и пространственное разделение положительных и отрицательных зарядов, обуславливающих возникновение сильных электрических полей. Различают четыре разновидности атмосферных разрядов [4, 8]: 1 – коронный и искровой самостоятельные разряды, наблюдаемые в зонах значительной облачности на высотах тропосферы  $h \leq 15$  км и длящиеся около 0,2 мс (молнии); 2 – разновидности стримерной короны в области пониженной плотности воздуха, стартующие на вершинах грозовых туч  $h \sim 14-18$  км и распространяющиеся вверх до высот  $\sim 40-50$  км в виде голубых струй (джеты); 3 – распространяющиеся вниз «высотные заоблачные разряды, возникающие в мезосфере и нижней термосфере на высотах от 50 до 90 км и тесно связанные с молниевой активностью (спрайты), причем в нижней мезосфере» [9] «свечение спрайтов неоднородно и распадается на каналы, похожие на лабораторные стримеры, получаемые при высоком напряжении на электродах» [9]; 4 – кольцеобразные красные свечения в горизонтальной плоскости над спрайтами на высоте  $\sim 100$  км (эльфы).

Из перечисленных заоблачных разрядов наиболее распространёнными являются эльфы (на них приходится  $\sim 96\%$ ), далее идут спрайты ( $\sim 3\%$ ) и джеты ( $\sim 1\%$ ). Все они являются бесшумными и не очень яркими, транзитными (кратковременными), т.е. с продолжительностью свечения, например, для спрайтов 0,01–0,1 с.

Особый интерес для задач разведочной геофизики представляет разновидность атмосферных разрядов в виде молниевых разрядов, т.к. происхождение ЕЭМП атмосферной природы в основном связано именно с грозовой активностью (рис. 3).

Молнии появляются в атмосфере при напряженности электрического поля около 3 кВ/см, что на порядок ниже значения напряженности поля для электрического пробоя воздуха при нормальных условиях ( $E \sim 30$  кВ/см) [10].

В общей сложности на Земле происходит порядка 100 грозовых разрядов в секунду. Импульсы грозового разряда следуют в виде отдельных пачек импульсов. За основным разрядом – лидером (предразрядом) следует группа обратных разрядов (возвратный удар) внутри ионизированного канала, образованного лидером, и имеющая длительность 250–500 мс с интервалом между отдельными импульсами около 50 мс. В свою очередь

импульс предразряда всегда имеет двойную полярность и знакопеременную форму, сохраняющуюся с расстоянием и имеющую хорошую регулярность, что позволяет рассматривать импульсы предразряда как квазипериодические.

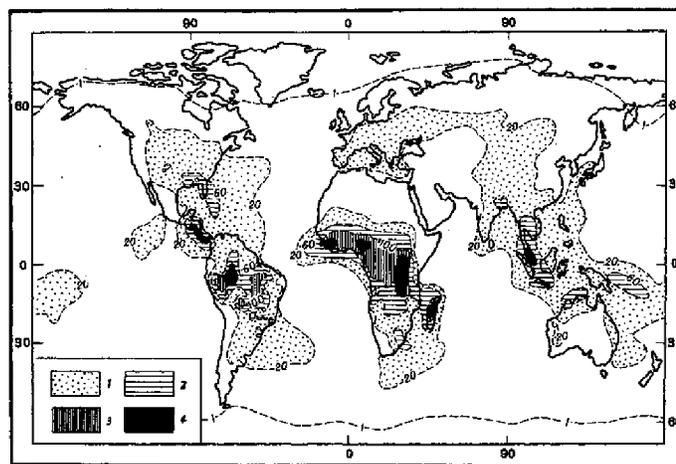


Рисунок 3 – Карта распределения числа дней с грозой по земному шару:  
1 – свыше 20; 2 – свыше 60; 3 – свыше 100; 4 – свыше 140

Как известно, «распределения амплитуд импульсов и межимпульсных интервалов для всего времени развития молниевых разряда свидетельствуют в пользу независимости и случайности импульсов. Следует отметить, что параметры данных распределений меняются в ходе развития разряда в части уменьшения характерной амплитуды импульса и характерного межимпульсного интервала к стадии возвратного удара. Характерная длительность наблюдаемых биполярных импульсов составляет сотни наносекунд при наиболее вероятной длительности первого пика около 75 нс на подготовительной стадии разряда, уменьшающейся примерно до 55 нс ближе к стадии возвратного удара.

Квазинепрерывная компонента излучения на подготовительной стадии разряда практически отсутствует и появляется только ближе к возвратному удару, по-видимому, на стадии развития ступенчатого лидера, где ее интенсивность тем не менее остается существенно ниже интенсивности импульсной компоненты. На стадии возвратного удара интенсивность коротковолнового радиоизлучения молнии увеличивается более чем на порядок за счет значительного усиления квазинепрерывной компоненты, которая на этой стадии становится преобладающей» [9].

В целом «под воздействием гроз в верхних частях Земли повсеместно и всегда существует слабое грозовое поле, которое является шумовым. Оно состоит из периодически повторяемых импульсов (цугов), носящих квазисинусоидальный характер с преобладающими частотами от 10 Гц до 10 кГц и напряженностью по электрической составляющей величиной в десятые доли мВ/м» [11].

В общем случае известны три типичные формы грозных разряда с соответствующими процентными распределениями (рис.4): а – тип  $a_1$  (встречается в 46,4% случаев), имеет самые большие амплитуды вначале; б – тип  $a_2$  (38,3%), имеет более равномерное распределение амплитуды в течение всей длительности; в – тип  $a_3$  (15,3%), характерны самые большие пиковые значения в середине.

Фронты грозовой активности являются источником импульсных электромагнитных волн. Импульсные грозовые разряды порождают широкий спектр электромагнитных колебаний от 0,01 Гц до 10 ГГц и выше, т.е. в область тепловых, световых и рентгеновских электромагнитных колебаний непосредственно в месте разряда. Из всего спектра колебаний ионосферный резонатор выделяет наиболее низкие частоты, т.к. более высокие частоты глубже проникают в ионосферу и сильнее затухают с увеличением

расстояния [12].

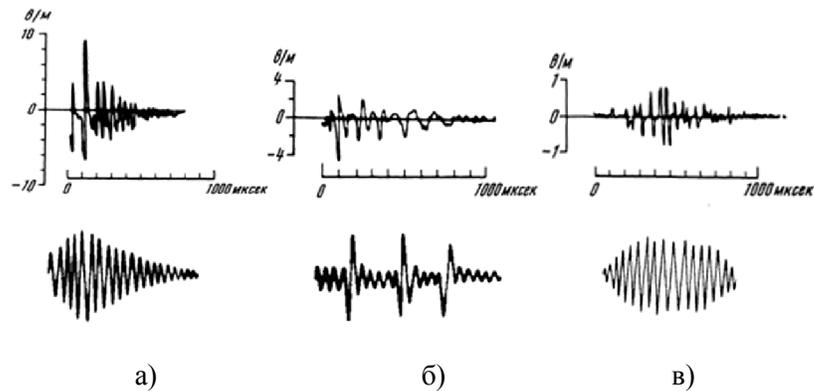


Рисунок 4 – Типичные формы грозových разрядов

Наибольший интерес для изучения представляют электромагнитные излучения в диапазоне КНЧ–ОНЧ (табл. 1), порождаемые в литосферно-атмосферно-ионосферной системе в основном грозowymi очагами Земли [13, 14].

Таблица 1–Таблица частотных диапазонов

Наименование частотного диапазона	Границы диапазона (Гц)	Наименование волнового диапазона	Границы диапазона (км)
Крайние низкие, КНЧ (ELF)	3...30	Декамегаметровые	100000...10000
Сверхнизкие, СНЧ (SLF)	30...300	Мегаметровые	10000...1000
Инфранизкие, ИНЧ (ULF)	300...3000	Гектокилометровые	1000...100
Очень низкие, ОНЧ (VLF)	3000...30000	Мириаметровые	100...10

Следует отметить, что «при распространении СНЧ–ОНЧ-волны в волноводе Земля-ионосфера часть энергии этой волны проникает через ионосферу в вышележащие слои плазмосферы и магнитосферы (рис. 5), что связано с образованием в нижней ионосфере областей неоднородностей, создаваемых процессами как в литосфере (тектонические разломы, проявления сейсмической активности и др.), так и в зонах повышенной электромагнитной активности (промышленные центры, энергетические объекты, мощные радиостанции)» [15]. Кроме того, «при волноводном распространении основное влияние на амплитудно-частотные характеристики СНЧ–ОНЧ-сигналов оказывают стенки волновода, образованные нижними отражающими слоями ионосферы, главным образом D-слой ионосферы» [10] (характерная высота слоя составляет 60–90 км), и поверхностью Земли.

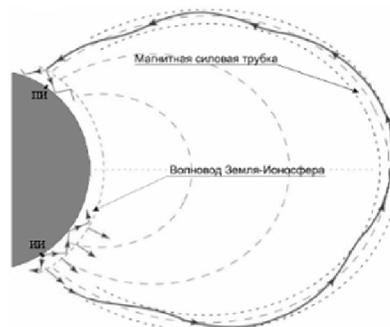


Рисунок 5 – Распространение СНЧ–ОНЧ-излучения: ИИ и ПИ – соответственно источник и приемник излучения

Электромагнитный фон рассматриваемых частотных диапазонов, измеренный в

произвольной точке пространства, содержит информацию о полной активности гроз в каждый момент времени. Это дает основание для использования радиофизических методов локации молний при исследовании мировой грозовой активности.

Диапазон 3–1000 Гц является сверхнизкочастотным по отношению к радиочастотам и «высокочастотным» по отношению к магнитотеллурическим вариациям естественного поля. Низкочастотное электромагнитное поле создается молниевыми разрядами дальних гроз в центрах мировой атмосферно-электрической активности, а также местных гроз. Количество грозовых дней в этих центрах достаточно велико и колеблется от 100 до 240 в году [16].

Спектр ЕЭМПЗ в диапазоне частот 3–100 Гц в значительной мере зависит от частотных характеристик объемного резонатора Земля–ионосфера, имеющего собственную нижнюю резонансную частоту порядка 7 Гц [17, 18]. При распространении электромагнитных волн вдоль земной поверхности поглощение энергии на резонансных частотах эндовибратора минимально. Поэтому на этих частотах повышается спектральная плотность мощности, что особенно заметно на первых частотах эндовибратора  $8 \pm 0,1$ ;  $14,1 \pm 0,2$ ;  $20 \pm 0,4$ ;  $26 \pm 0,8$  Гц и т.д. [22].

Важно отметить, что в «атмосфере Земли существует несколько резонаторов для электромагнитных волн различных типов. Одним из таких резонаторов является Шумановский резонатор (ШР) – сферическая полость между Землей и ионосферой. Резонансы в ШР возникают на основной моде волны *E*-типа, имеющей радиальную составляющую электрического поля и горизонтальную – магнитного поля. Собственные частоты этого резонатора без учёта потерь  $f_n \approx (c/2\pi R)[n(n+1)]^{1/2}$ , где  $R=6370$  км – радиус Земли,  $c$  – скорость света,  $n = 1, 2, \dots$  – целое число, определяющее номер моды колебаний ( $f_{n \max} \approx 8, 14, 20, 26, 32, \dots$  Гц.) [22]. Согласно современным представлениям, основными источниками возбуждения ШР являются вертикальные молниевые разряды. Кроме того, определенный вклад могут вносить и электромагнитные колебания, генерируемые в магнитосфере [23]. Характеристики резонансных колебаний существенно зависят от времени суток и сезона. Кроме этих квазипериодических вариаций, наблюдаются значительные (более чем на порядок) возрастания амплитуды колебаний» [9].

#### **Анализ свойств компонент сигналов КНЧ–ОНЧ-диапазонов**

Одним из «характерных свойств импульсного излучения молнии является его внезапное начало и слабое изменение интенсивности в течение всего времени развития разряда. Частота следования импульсов остается практически неизменной на подготовительной стадии развития молнии, составляя 30–40 импульсов за миллисекунду. При дальнейшем развитии разряда частота следования импульсов существенно повышается (до 10 раз непосредственно перед возвратным ударом). При этом среднеквадратическая интенсивность излучения меняется незначительно в связи с пропаданием импульсов большой амплитуды» [9].

Наблюдаемый при этом естественный КНЧ–ОНЧ-сигнал морфологически состоит из двух компонент: 1 – фоновый сигнал, формируемый перекрывающимися друг друга КНЧ–ОНЧ-атмосфериками, излучаемыми совокупностью разрядов молний, распределенных по поверхности Земли; 2 – СНЧ-всплески, источниками которых служат сверхмощные разряды [9].

Атмосферика представляют собой электромагнитные сигналы от разрядов молний на достаточно большом расстоянии от места их возникновения [13], которым соответствуют частоты резонанса в полости ионосферного волновода 3 Гц – 1 КГц и которые в основном состоят из серии высокочастотных колебаний с преимущественной частотой несколько килогерц и аperiodического колебания – «хвоста» – с преимущественной частотой несколько сот герц [13, 14]. Поэтому электромагнитное поле гроз имеет два максимума спектральной плотности мощности (0,5 – 1 кГц) и (6 – 8

кГц).

По «мере увеличения расстояния от места возникновения разряда до точки приема величина низкочастотного максимума увеличивается, а высокочастотного – уменьшается, т.е. низкочастотный максимум смещается в сторону низких, а высокочастотный – в сторону высоких частот» [18]. Кроме того, «средний уровень поля атмосфериков подвержен заметным суточным и сезонным вариациям, т.е. вектора напряженности электрической ( $E$ ) и магнитной ( $H$ ) составляющих не остаются постоянными по амплитуде и направлению. Однако средний уровень напряженности  $E_{cp}$  и  $H_{cp}$  за время в течение десятка секунд зависит от удельного электрического сопротивления слоев геоэлектрического разреза, над которым ведутся наблюдения, что говорит возможности использования в качестве измеряемых параметрами атмосфериков различные составляющие» [18]  $E_{cp}$  и  $H_{cp}$ .

В зависимости от генезиса атмосферерики можно условно разделить на следующие типы: сферерики (Spheric), или радиоатмосферерики; твики (Tweek), или твик-атмосферерики; вистлер (Whistler), или свистящие атмосферерики.

В случае вырождения импульсного сигнала грозового разряда в низкочастотный сигнал звукового диапазона наблюдается явление свистящих атмосферерики, которые представляют собой электромагнитное излучение, распространяющееся вдоль силовых линий магнитного поля Земли.

Кроме того, каждый удар молнии возбуждает электромагнитный импульс, известный как радиоатмосферерик, или сферерик, представляющий собой скоротечные широкополосные электромагнитные поля крайне низкой частоты (extremely low frequency), которые распространяются в виде нулевой, или qTEM моды волновода Земля–ионосфера. В общем случае сферерики, основная часть энергии которых лежит в полосе частот от 3 Гц до 30 кГц, порождаются, собственно, обратными разрядами. Для практических целей за источник сферерика достаточно принимать первый обратный разряд (который превышает последующие в 2–5 раз).

Обобщая, можно констатировать, что сферерики порождаются в основном двумя типами молний: 1 – CG-молнии (так называемые *cloud-to-ground*), которые бьют из облаков в Землю и разряжаются на поверхности Земли хотя бы частично; 2 – IC-молнии (*intracloud*), т.е. внутриоблачные молнии.

Наиболее информативными являются атмосферерики, распространяющиеся по трассе, проходящей под ночной ионосферой. Затухание, обусловленное потерями в ионосфере, падает при повышении ее нижней границы в ночных условиях, и наблюдаются так называемые отражательные атмосферерики, или твики. Такие твик-атмосферерики формируются в результате многократного переотражения импульса, излученного разрядом молнии, от земной поверхности и нижней границы ионосферы. Следует отметить, что твик-атмосферерики имеют яркое проявление, как правило, в ночных условиях и отличаются от обычных атмосферерики большей длительностью (10–150 мс).

Кроме того, сферерики и твик-атмосферерики, порождаемые разными типами молний, различаются спектральным составом, то есть обладают большим или меньшим присутствием высокочастотных гармоник в составе сигнала. Например, для сферерики, порождаемых CG-молниями, отношение пиковых интенсивностей в полосе ОНЧ – (5,5–9,5 кГц) и СНЧ – (< 1,5 кГц) радиоволн в среднем на 14 % выше, чем для остальных [17]. Кроме того, широкополосные естественные сигналы СНЧ–ОНЧ твик-атмосферерики благодаря частотной дисперсии возможно вычленить и отдельно исследовать отдельные волноводные моды.

Амплитуды СНЧ-всплесков превышают уровень фона в несколько (до ~10) раз, а интервалы между ними лежат в диапазоне от десятков секунд до нескольких минут. СНЧ-всплески являются изолированными во времени событиями, и координаты их источников, а также параметры распространения СНЧ-радиоволн могут быть определены с помощью

методов, основанных на анализе спектров горизонтального магнитного и вертикального электрического полей.

Следует иметь в виду, что существуют еще и электромагнитные поля, создаваемые промышленными установками, а также длинно- и сверхдлинноволновыми радиостанциями. Напряженность такого рода полей может превосходить уровень ЕЭМП в десятки тысяч раз, но при этом уровень средней напряженности этих полей в полосе 17–23 Гц плавно изменяется во времени. При отсутствии сильных местных гроз эти изменения, как суточные, так и сезонные, незначительны. Интервалы времени, в течение которых уровень средней напряженности подобных полей имеет минимальные значения, для разных районов СНГ неодинаковы, но для одного и того же района временной ход уровня средней напряженности поля повторяется (рис. 6).

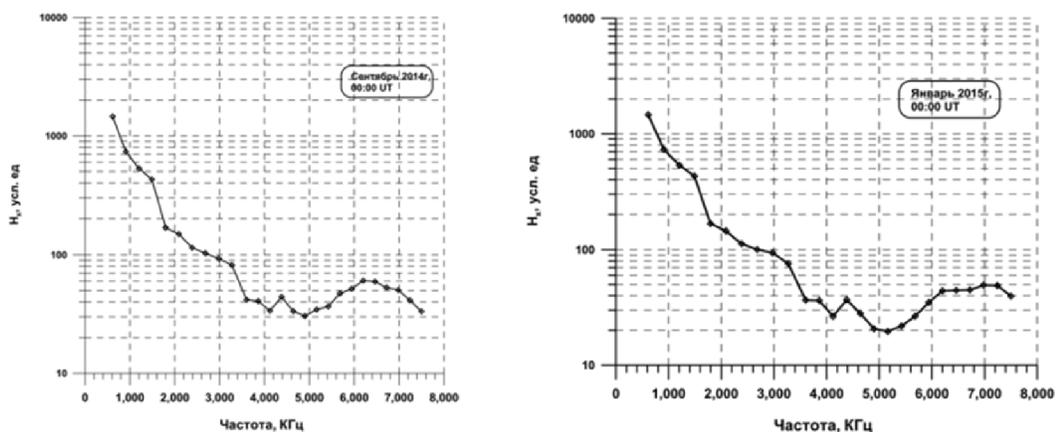


Рисунок 6 – Графики повторяемости средней напряженности магнитного поля

Исходя из свойств КНЧ–ОНЧ-диапазонов, нужно отметить, что при решении отдельных прикладных задач геофизики, ориентированных на применении этих свойств, можно условно разделить весь диапазон на следующие поддиапазоны: 1 –  $f_{1д} < 5$  Гц, ограниченный снизу возможностями антенной техники и смыкающийся с «диапазоном частот колебаний теллурических токов и микропульсаций магнитного поля Земли, а сверху он ограничен близостью нижней резонансной частоты земного шара; 2 –  $f_{2д} \in [5–50$  Гц], охватывающий практически весь спектр наблюдаемых резонансных частот земного шара и ограниченный сверху частотой силовой сети; 3 –  $f_{3д} \in [60$  Гц–3 кГц], ограниченный снизу частотой силовой сети североамериканского континента, а сверху – нижней критической частотой волновода «Земля-ионосфера», которая обычно лежит в пределах 1,5–4,5 кГц в зависимости от состояния ионосферы и свойств подстилающей поверхности; 4 –  $f_{4д} \in ]3–50$  кГц], для которого характерен волноводный тип распространения радиоволн в сферическом волноводе Земля–ионосфера [20].

Из анализа имеющихся результатов «инструментальных наблюдений ЕЭМП, полученных путем усреднения на месячном интервале интенсивности импульсного потока, можно сделать следующие выводы: 1 – суточные вариации интенсивности ОНЧ-импульсного потока ЕЭМП довольно устойчивы для каждого сезона года, при этом максимум интенсивности в летнее время (период наибольшей местной грозовой активности) в 60–70 раз превышает максимум интенсивности в зимнее время года; 2 – интенсивность импульсного потока ЕЭМП по одинаковым месяцам из года в год имеет сходные суточные вариации с высокими коэффициентами корреляции 0,75–0,98 по обоим направлениям приема север-юг и запад-восток; 3 – преимущественное направление прихода импульсного потока ЕЭМП с направления запад-восток во все сезоны года» [21].

Для «геологической разведки наибольший интерес представляет шумовая составляющая ЕЭМП, которая в диапазоне частот 8–300 Гц максимальна. В разных

районах напряженность ее электрической компоненты меняется от 0,01 до 10 мкВ/м, а магнитной от  $10^{-4}$  до  $10^{-3}$  Гн/м. Так как поле зависит от многих факторов, то мгновенные значения напряженностей электрического и магнитного полей случайным образом изменяются во времени и эллиптически поляризованы в пространстве. Изменения во времени (вариации) средних значений напряженности поля оказываются плавными и не превышают 10–15% за час и 150–170% за сутки, а сезонные и годовые вариации редко превышают 100–200%. Причем летом уровень поля выше, чем зимой, а резкие отклонения от средних значений наблюдаются лишь во время местных гроз и за счет всевозможных промышленных помех» [13, 16].

Исходя из результатов исследований, можно констатировать, что с «началом развития молниевых разрядов отношение средних амплитуд резко возрастает, указывая на импульсный характер излучения. При этом среднеквадратическая амплитуда сигнала увеличивается почти на порядок, а медианная практически не изменяется. Такое поведение отношения средних амплитуд сохраняется вплоть до возвратного удара, вблизи которого оно начинает уменьшаться, возвращаясь к значению, близкому к 1,5, непосредственно во время возвратного удара» [9].

При разработке соответствующих алгоритмов регистрации информационных сигналов следует учитывать тот факт, что в звуковом и субзвуковом диапазоне частот ЕЭМП имеет сложный импульсно-шумовой характер с наибольшей напряженностью шумовой части в диапазоне частот 8–300 Гц.

### **Заключение**

Обобщая, можно констатировать, что, по сути, ЕЭМП представляет собой высокочувствительный вид переносчика информации о земных и космических процессах. Поведение ЕЭМП определяется фактически «тремя основными свойствами среды: удельным электрическим сопротивлением, диэлектрической проницаемостью и магнитной восприимчивостью. Удельное сопротивление в земле варьируется в широком диапазоне, тогда как другие физические свойства, используемые в геофизической разведке, например, акустические волны, плотность, магнитная восприимчивость, обычно варьируются в достаточном ограниченном диапазоне» [24].

«Многие петрофизические параметры влияют на удельное сопротивление, наиболее важными из которых являются наличие воды или углеродов в породе, соленость грунтовых вод, количество электрически проводящих минералов в породе, температура и давление. Все эти факторы делают удельное сопротивление естественным индикатором присутствия во вмещающей среде различного рода месторождений полезных ископаемых. Поэтому при геофизических исследованиях с относительно низкими частотами именно удельное сопротивление является наиболее информативным из физических свойств, характеризующих как вмещающую среду» [22], так содержащиеся в ней структурные компоненты.

Известно, что для однородной среды кажущееся сопротивление равно ее удельному сопротивлению  $\rho_r$ , которое в случае горизонтально-слоистой среды зависит от параметров разреза (мощности и сопротивления слоев) и частоты вариаций поля. При этом на поверхности горизонтально-однородной среды напряженность магнитной компоненты поля с точностью до нескольких процентов равна удвоенной величине напряженности возбуждающего поля и не зависит от электрических параметров [22].

На горизонтально-неоднородных средах зависимости между параметрами разреза и компонентами естественного электромагнитного поля более сложные. Отметим только, что магнитная компонента поля при изменении электрических параметров геологического разреза изменяется меньше, чем электрическая. Исключения представляют электропроводящие объекты, над которыми магнитная компонента поля изменяется больше, чем электрическая.

Таким образом, особенности геологического разреза вызывают изменения

абсолютных осредненных величин составляющих электрического и магнитного полей и параметров их абсолютных осредненных эллипсов поляризации. Причем наиболее чувствительной к изменениям электрических параметров разреза является электрическая компонента поля.

Измерения средней напряженности компонент электромагнитного поля в субзвуковом диапазоне частот, выполненные в различных районах стран СНГ, показывают, что электрическая компонента изменяется от сотых долей до единиц микровольт на метр, а магнитная компонента колеблется в пределах  $10^{-9}$ – $10^{-8}$  Гн/м.

В целом средние значения напряженности поля и элементов эллипса поляризации зависят от электрических свойств пород вблизи пункта наблюдения. Электрические и магнитные составляющие наиболее чувствительны к изменению электропроводности пород, и над разными геоэлектрическими разрезами они меняются в 2–10 раз, т.е. значительно больше существующих вариаций» [22, 25].

Приведенное в статье обобщение существующих разрозненных и фрагментарных сведений о свойствах ЕЭМП и отдельные сформулированные положения могут быть использованы разработчиками специализированной геофизической аппаратуры, ориентированной на решение существующих геофизических задач.

### **Литература**

1. Финкельштейн М.И., Карпучин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. Подповерхностная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1994. – 216 с.
2. Брякин, И. В. Особенности георадиолокационного зондирования / И. В. Брякин // Проблемы автоматизации и управления. – 2013. – № 2(25). – С. 111–121.
3. Брякин, И. В. Системы подповерхностного зондирования для малоглубинной геофизики / И. В. Брякин // Проблемы автоматизации и управления. – 2015. – № 1(28). – С. 83–93.
4. [http://freme.vlsu.ru/trudy\\_pdf/freme\\_2016\\_book\\_2.pdf](http://freme.vlsu.ru/trudy_pdf/freme_2016_book_2.pdf) (дата обращения: 22.02.22)
5. Александров М.С. Исследование атмосферных радиопомех ОНЧ- и НЧ-диапазонов и их источников // Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. № 10. – С. 3–25.
6. Podoltsev A. Global electric rlc -circuit of a system "the earth's crust - atmosphere - ionosphere" and its resonance properties // Технічна електродинаміка. – №2. – 2016. – С. 3–10
7. Козлов В.И., Муллаяров В.А. Грозовая активность в Якутии. – Якутск: ЯФ Изд-во СО РАН, 2004. – 104 с.
8. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Цыдыпов Ч.Ц., Буянова Д.Г. Естественное электромагнитное поле в Забайкалье. – М.: Наука, 1989. – 112 с.
9. [http://voeikovmgo.ru/download/Atm\\_Elec\\_conf/AE\\_tom\\_1.pdf#6](http://voeikovmgo.ru/download/Atm_Elec_conf/AE_tom_1.pdf#6) (дата обращения: 22.02.22)
10. <https://dlib.rsl.ru/01007576171> (дата обращения: 22.02.22)
11. <https://dlib.rsl.ru/01004125548> (дата обращения: 22.02.22)
12. Ремизов Л.Т. Естественные радиопомехи. – М.: Наука, 1985. – 196 с.
13. Блиох П.В., Николаенко А.П., Филиппов Ю.Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости земля–ионосфера. – Киев. Наукова думка, 1977. – 200с.
14. Кириллов В.В., Копейкин В.Н., Муштак В.К. Электромагнитные волны СНЧ-диапазона в волноводном канале Земля–ионосфера. // Геомагнетизм и Аэрономия. – 1997. –Т. 37. –№3. – С. 114–120.

15. [http://idg.chph.ras.ru/data\\_files/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%A0%D1%8F%D1%85%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE.pdf#1](http://idg.chph.ras.ru/data_files/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%A0%D1%8F%D1%85%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE.pdf#1) (дата обращения: 22.02.22)
16. Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. – М.: Наука, 1983. –192 с.
17. Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. – М.: Научный мир, 1997. – 218 с.
18. <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-osnovy-geofizicheskikh-metodov.pdf>
19. Молчанов О.А. Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околосредней плазме. – М.: Наука, 1985. –224 с
20. [http://elib.rshu.ru/files\\_books/pdf/img-216170906.pdf](http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-216170906.pdf) (дата обращения: 22.02.22)
21. Нагуслаева И.Б., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г. Сезонные и пространственные изменения суточных вариаций ОНЧ импульсного потока естественного электромагнитного поля, регистрируемые на средних широтах // Геомагнетизм и аэронавигация. – Т. 56. – №3. – 2016. – С. 380
22. Башкуев Ю.Б. Электрические свойства природных слоистых сред. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996. – 207с.
23. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Ханхараев А.В. Анализ условий распространения СНЧ-радиоволн на трассе «Зевс» – Забайкалье // Известия вузов. – Радиофизика. – Т. XLVI. – № 12. – 2003. – С. 1017–1026.
24. Ангархаева Л.Х., Башкуев Ю.Б., Мельчинов В.П. Обратная задача для слоистой импедансной среды // Радиотехника и электроника. –1997. – Т.42. №10. – С. 1169–1173.
25. Адушкин В.В., Спивак А.А. Физические поля в приповерхностной геофизике. – М.: ГЕОС, 2014. – 360 с.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 631.6. (575.2)

*Пресняков Константин Александрович**Керимкулова Гулсаат Кубатбековна, e-mail: [gulsaat@mail.ru](mailto:gulsaat@mail.ru)**Аскалиева Гулзада Орозобаевна, e-mail: [87guzya@mail.ru](mailto:87guzya@mail.ru)**Институт машиноведения и автоматизации НАН КР*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ОТКРЫТОМ БУРНОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВОДЫ (НА ОСНОВЕ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ ВОДЫ)

Выведены математические соотношения характеристик полей динамического давления и его пульсаций в открытом турбулентном потоке воды. Легитимность указанных соотношений подтверждается, в частности, тем, что доли пульсационного движения от осредненного движения имеют один и тот же порядок, как для скорости, так и для динамического давления.

**Ключевые слова:** нормы динамического давления и его пульсаций, распределения динамического давления и его пульсаций по глубине потока воды.

**Введение**

Известно [1], что для открытого турбулентного потока воды выполняется следующая аксиома: поле гидродинамического давления в турбулентном потоке воды и поле его пульсаций зависят от наличия инерционных сил потока, а также от поля компонент скорости воды и поля его пульсаций. Можно показать, что выражение для динамического давления турбулентного потока воды имеет следующий вид:

$$P_d = \rho \cdot u^2 + 1,05^2 \cdot u_*^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}),$$

(1)

где  $P_d$  – динамическое давление, Па;  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $u$  – продольная компонента скорости воды, м/с;  $u_*$  – динамическая скорость потока воды, м/с;  $\psi(\tilde{y})$  – координатная часть распределения пульсаций вертикальной компоненты скорости по глубине потока [2]

$$\psi(\tilde{y}) = \frac{0,677 \cdot \tilde{y}}{\tilde{y} + 0,036} \cdot (\tilde{y}^2 - 2 \cdot \tilde{y} + 2),$$

где  $\tilde{y}$  – относительная вертикальная координата.

Можно также установить [1], что распределение пульсаций динамического давления по глубине потока воды имеет вид:

$$P'_d = 2 \cdot \rho \cdot \left( u(\tilde{y}) \cdot 2,10 \cdot u_* \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot u_*^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right),$$

где  $P'_d$  – пульсации динамического давления воды, Па;  $u(\tilde{y})$  – распределение продольной компоненты скорости воды по глубине потока, м/с;  $\phi(\tilde{y})$  – координатная часть распределения пульсаций продольной компоненты скорости воды по глубине потока [2]

$$\phi(\tilde{y}) = 0,25 + \left( \frac{0,21}{0,28 + \tilde{y}} \right).$$

Понятно, что как динамическое давление, так и его пульсации зависят, в частности, от выбора конкретного распределения продольной компоненты скорости воды по глубине потока.

**Постановка задачи исследования**

Известна [3, 4] для турбулентного потока воды параболическая зависимость ее от вертикальной координаты

$$u(\tilde{y}) = u_m \cdot \left( 1 - \frac{m_1}{C} \cdot \frac{\bar{u}}{u_m} \cdot (1 - \tilde{y})^2 \right), \quad (5)$$

$$m_1 = 0,35 \cdot C + 3, \quad (6)$$

где  $C$  – коэффициент Шези,  $m^{1/2}/c$ ;  $m_1$  – размерный ( $m^{1/2}/c$ ) параметр, зависящий от коэффициента Шези;  $\bar{u}$  – средняя скорость воды,  $m/c$ .

Представляет интерес исследование распределений динамического давления и его пульсаций по глубине потока воды с использованием параболического профиля скорости.

### Задачи исследований

Найти выражения для поля динамического давления и поля его пульсаций в открытом бурном турбулентном потоке воды с использованием параболического профиля скорости воды.

### Решение поставленных задач

I. Распределения динамического давления и его пульсаций по глубине потока воды.

Расчетные формулы для искомым характеристик запишутся в следующем виде:

– для динамического давления

$$P_d = \rho \cdot \left( u_m \cdot \left( 1 - \frac{m_1}{C} \cdot \frac{\bar{u}}{u_m} \cdot (1 - \tilde{y})^2 \right) \right)^2 + 1,05^2 \cdot u_*^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}); \quad (7)$$

– для пульсаций динамического давления

$$P'_d = 2 \cdot \rho \cdot \left( u_m \cdot \left( 1 - \frac{m_1}{C} \cdot \frac{\bar{u}}{u_m} \cdot (1 - \tilde{y})^2 \right) \right) \cdot 2,10 \cdot u_* \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot u_*^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \quad (8)$$

Используем эмпирические данные для канала Туш (створы 3, 13, 15, 25, 38) и канала Меркенский (створы б, в) [5, 4].

Результаты расчетов приведены на рисунке 1 и 2.

Динамическое давление распределяется по глубине потока воды согласно кривой, имеющей максимум в приповерхностном слое потока воды (рис. 1).

При этом значение рассматриваемого параметра меняется в пределах от 14,0 до 67,3 кПа.

Распределения пульсаций динамического давления по глубине потока воды описываются кривыми, имеющими максимум в придонной части потока воды (рис. 2).

Максимальные значения упомянутых характеристик заключены в интервале от 1,9 до 6,0 кПа.

Обращают на себя внимание следующие характерные особенности: динамическое давление имеет максимальные значения в приповерхностном слое потока воды, что согласуется с распределением в нем инерционных сил; распределение пульсаций динамического давления совпадает с характером распределения пульсаций продольной компоненты скорости воды по глубине потока, что неудивительно, так как и та, и другая характеристики являются следствием наличия в потоке воды упомянутых сил.

II. Нормы динамического давления и его пульсаций.

Для получения относительных распределений динамического давления и его пульсаций необходимо установить характерные значения указанных характеристик (норма динамического давления и норма пульсаций его). Для случая  $\tilde{P}_d = \tilde{P}'_d(\tilde{y})$ . Логично выбрать в качестве нормы динамического давления его максимальные значения, т.е. (табл. 1)

$$P_d^M = P_d(\tilde{y} = 1) = \rho \cdot \left( u_m \cdot \left( 1 - \frac{m_1}{C} \cdot \frac{\bar{u}}{u_m} \cdot (1-1)^2 \right) \right)^2 + 1,05^2 \cdot u_*^2 \cdot \psi^2(1), \quad (9)$$

Таблица 1 – Зависимость нормы динамического давления от числа Фруда

Опыт	Fr	$P_d^M$ , кПа
канал «Туш»		
3	6,39	41,34
13	8,88	67,24
15	5,91	14,90
25	5,01	13,84
38	6,22	15,0
канал Меркенский		
б	6,04	33,64
в	6,61	15,52

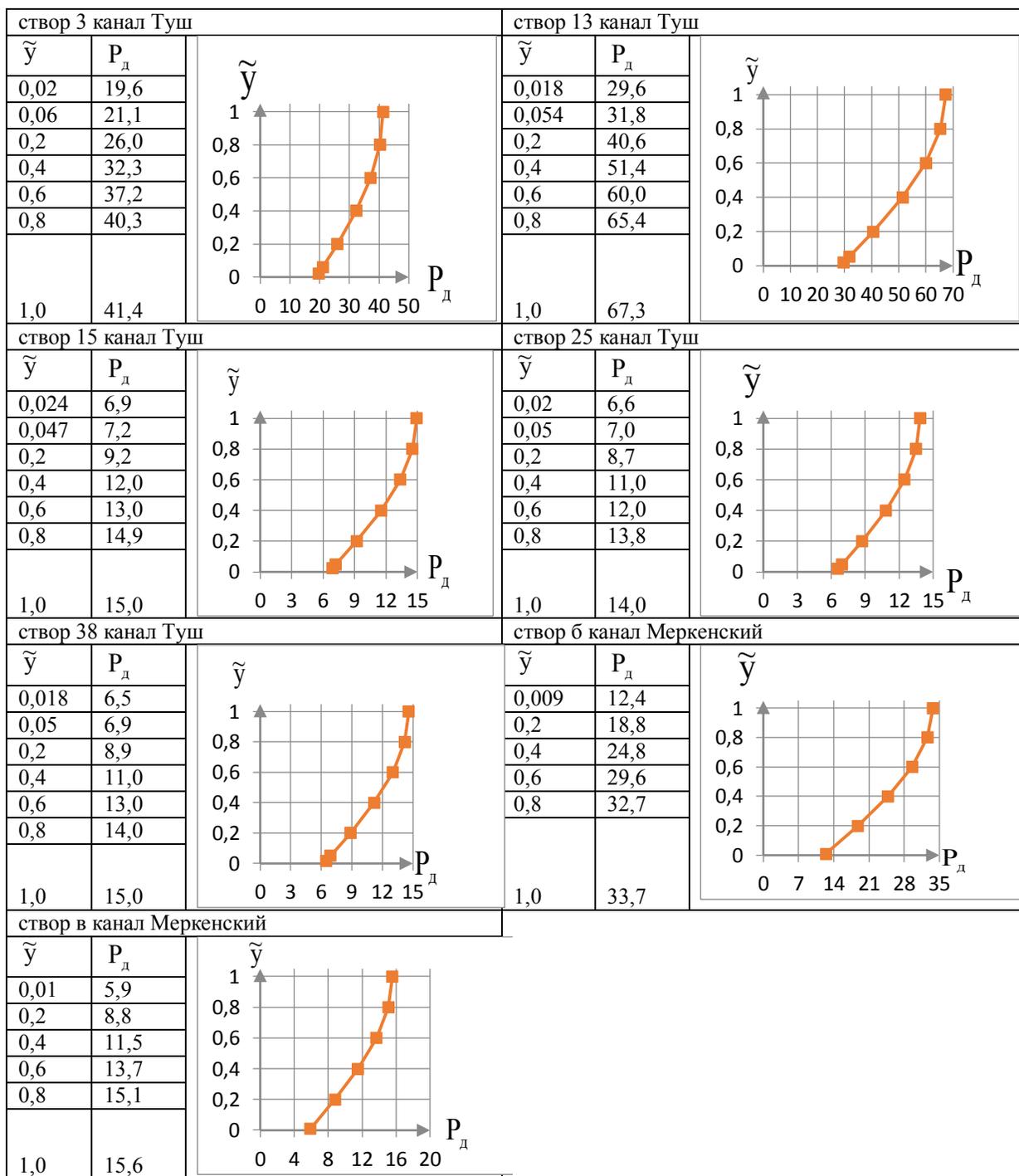


Рисунок 1 – Распределения динамического давления открытого бурного турбулентного потока воды по его глубине

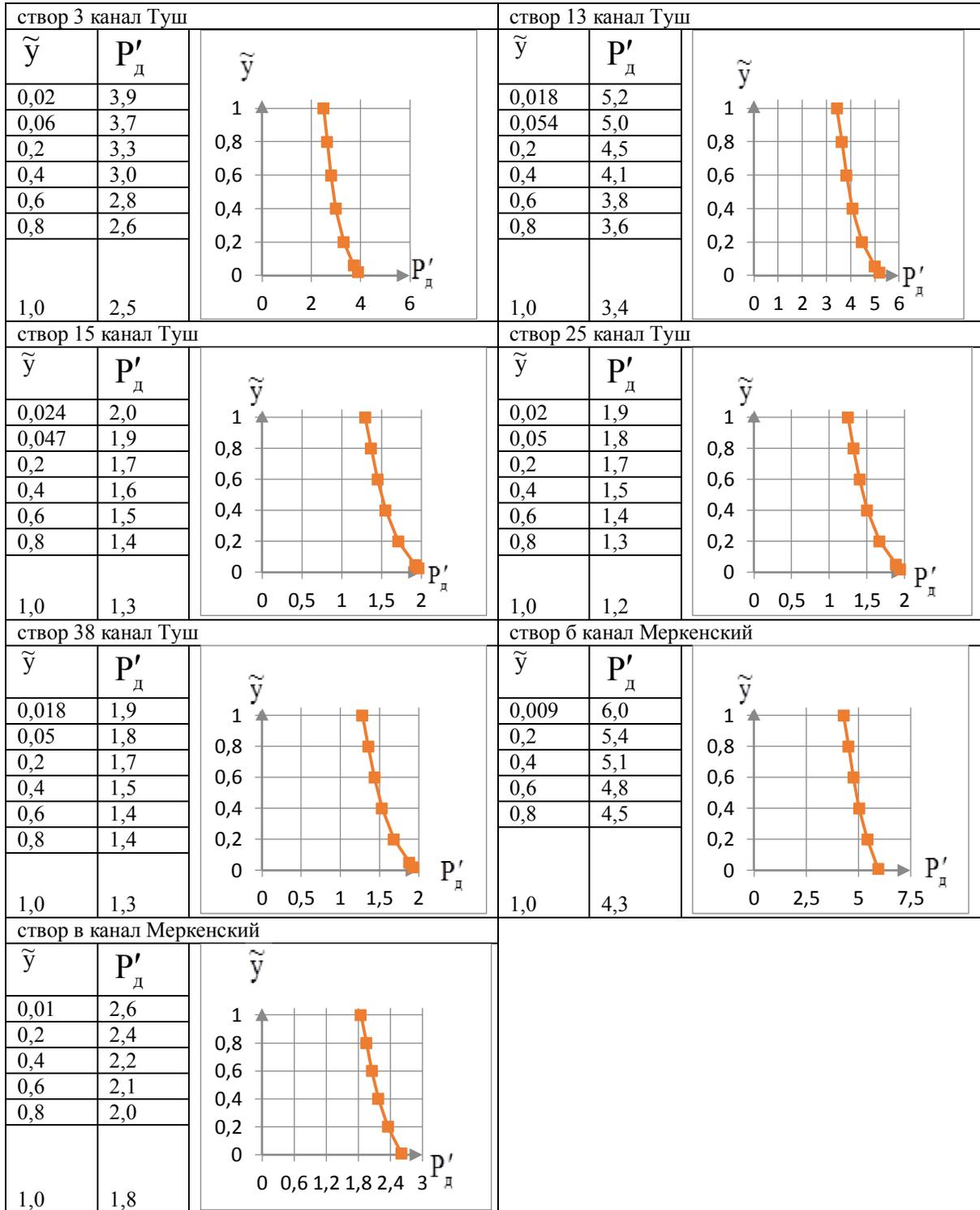


Рисунок 2 – Распределения пульсаций динамического давления открытого бурного турбулентного потока воды по его глубине

Обычно при рассмотрении относительных значений пульсаций компонент скорости воды в качестве делителя выбирают максимальные значения пульсаций соответствующих компонент скорости [2]. Указанные нормы обозначим буквой «т», т.е. имеется в виду традиционный подход к этому вопросу.

Кроме того (табл. 2)

$$P'_{д,т} = P'_d(\tilde{y} = \tilde{\Delta}) = 2 \cdot \rho \cdot \left( u_m \cdot \left( 1 - \frac{m_1}{C} \cdot \frac{\bar{u}}{u_m} \cdot (1 - \tilde{\Delta})^2 \right) \cdot 2,10 \cdot u_* \cdot \phi(\tilde{\Delta}) + 1,05^2 \cdot u_*^2 \cdot \psi^2(\tilde{\Delta}) \right) \quad (10)$$

Таблица 2 – Зависимость традиционной нормы пульсаций динамического давления от числа Фруда

Опыт	Fr	$P'_{д,т}^M$ , кПа
канал Туш		
3	6,39	3,73
13	8,88	5,03
15	5,91	1,95
25	5,01	1,90
38	6,22	1,89
канал Меркенский		
б	6,04	6,34
в	6,61	2,76

В гидравлике [6] часто интересуются относительными значениями пульсаций какой-либо гидравлической характеристики, которая определяется отношением пульсаций рассматриваемой величины к значениям самой величины, т.е. практически долей пульсационного движения по отношению к осредненному движению.

Поэтому в случае рассмотрения динамического давления подобной долевой нормы выступает само распределение динамического давления по глубине потока воды, т.е.

$$P'_{д,д} = P_d(\tilde{y}). \quad (11)$$

1. Относительные распределения динамического давления и его пульсаций по глубине потока воды.

Подобные распределения запишутся в виде:

➤ для динамического давления (рис. 3)

$$\tilde{P}_d = \frac{P_d(\tilde{y})}{P_d^M}; \quad (12)$$

где  $\tilde{P}_d$  – относительные распределения динамического давления по глубине потока воды;  $P_d(\tilde{y})$  – распределение динамического давления по глубине потока воды, Па;  $P_d^M$  – максимальное значение динамического давления, Па;

➤ для пульсаций динамического давления (традиционное распределение пульсаций) (рис. 4)

$$\tilde{P}'_{д,т} = \frac{P'_{д,т}}{P'_{д,т}^M}; \quad (13)$$

где  $\tilde{P}'_{д,т}$  – относительные распределения пульсаций динамического давления по глубине потока воды (традиция);  $P'_{д,т}$  – пульсаций динамического давления, Па;  $P'_{д,т}^M$  – максимальные значения пульсаций динамического давления, Па;

➤ для пульсаций динамического давления (долевое распределение) (рис. 5)

$$\tilde{P}'_{д,д} = \frac{P'_d(\tilde{y})}{P_d(\tilde{y})}; \quad (14)$$

где  $\tilde{P}'_{д,д}$  – относительные распределения пульсаций динамического давления (долевое распределение);  $P'_d(\tilde{y})$  – распределение пульсаций динамического давления, Па;  $P_d(\tilde{y})$  – распределение динамического давления по глубине потока воды, Па.

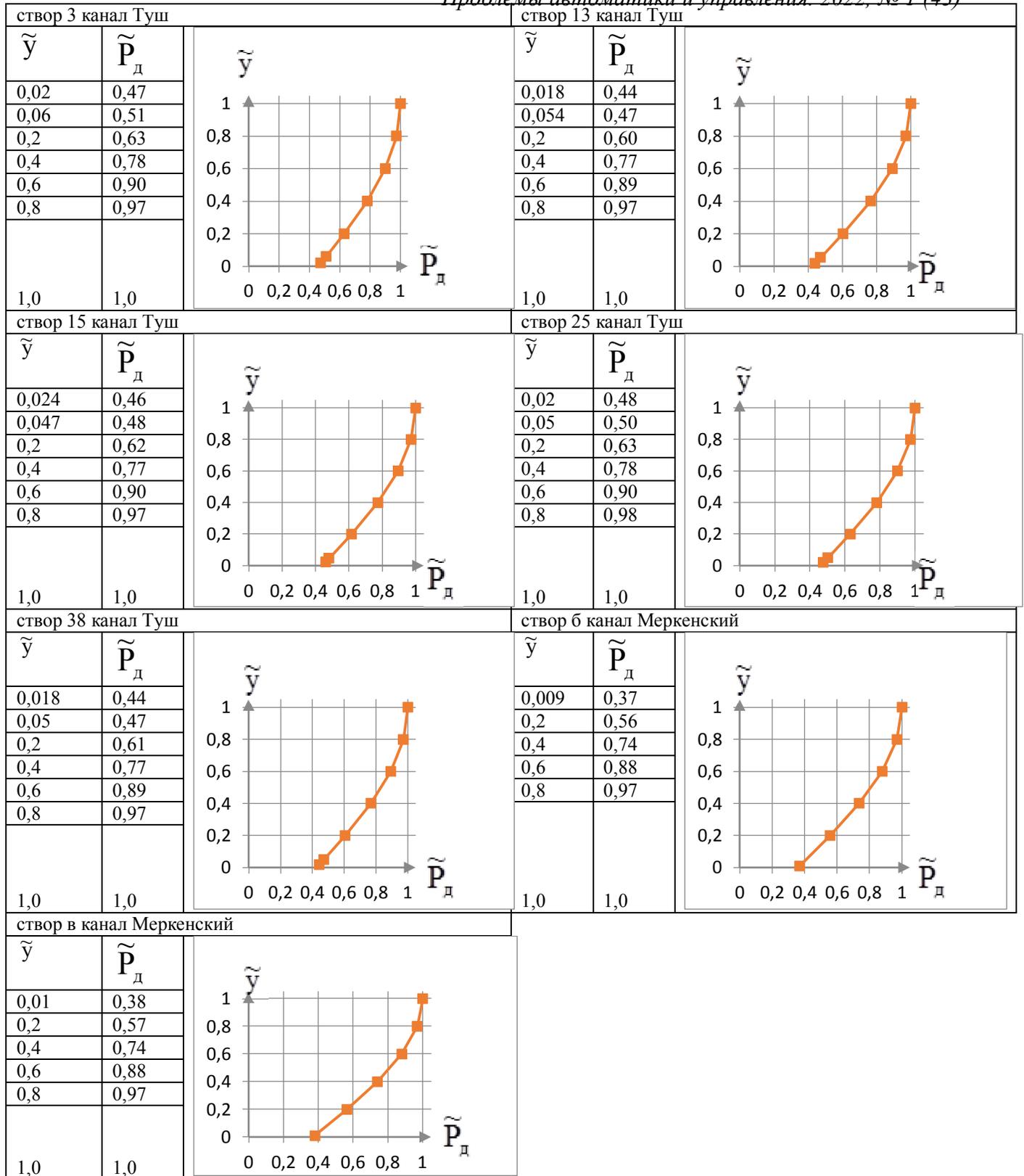


Рисунок 3 – Относительные распределения динамического давления по глубине потока воды

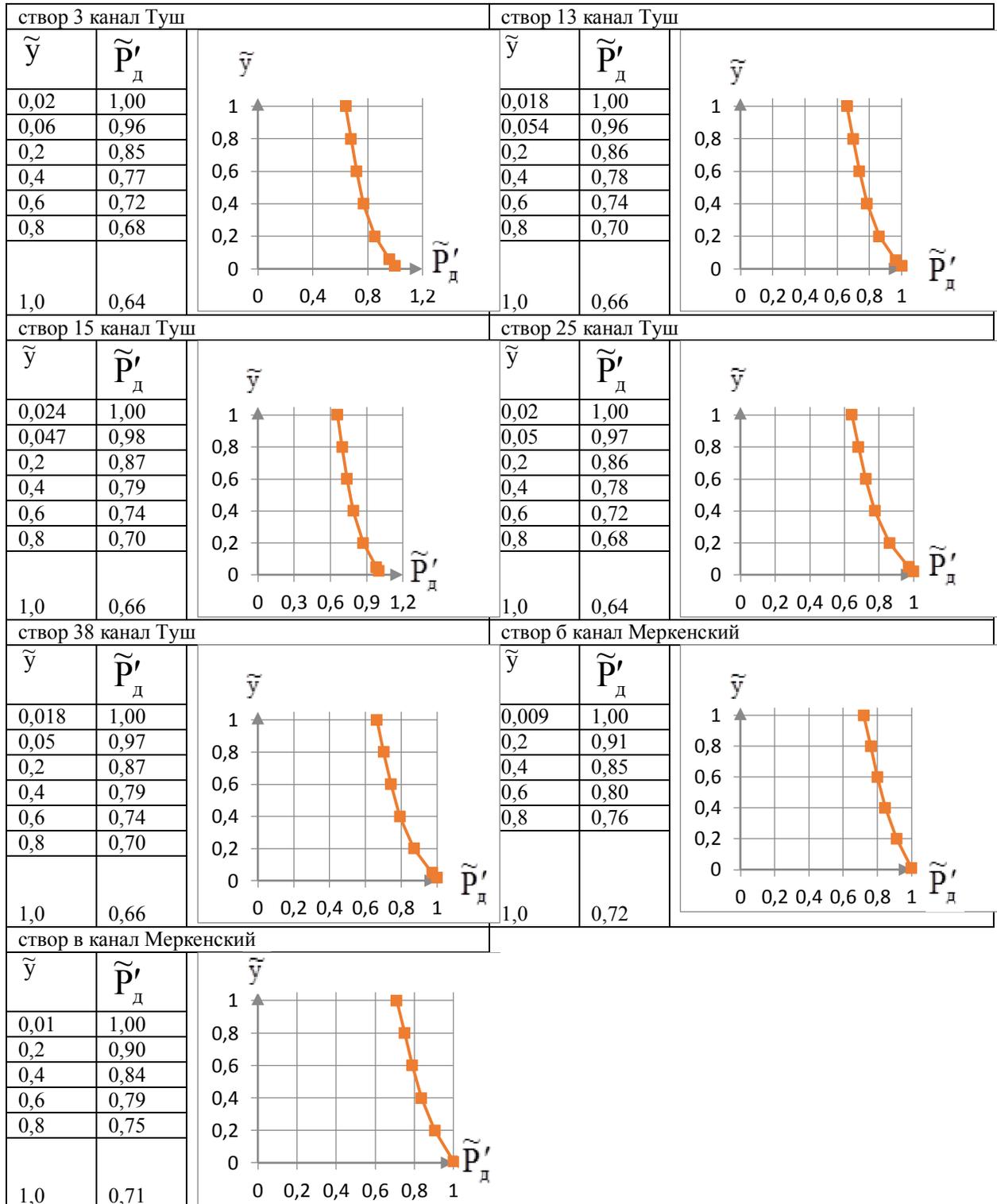


Рисунок 4 – Традиционные распределения относительных значений пульсаций динамического давления по глубине открытого бурного турбулентного потока воды

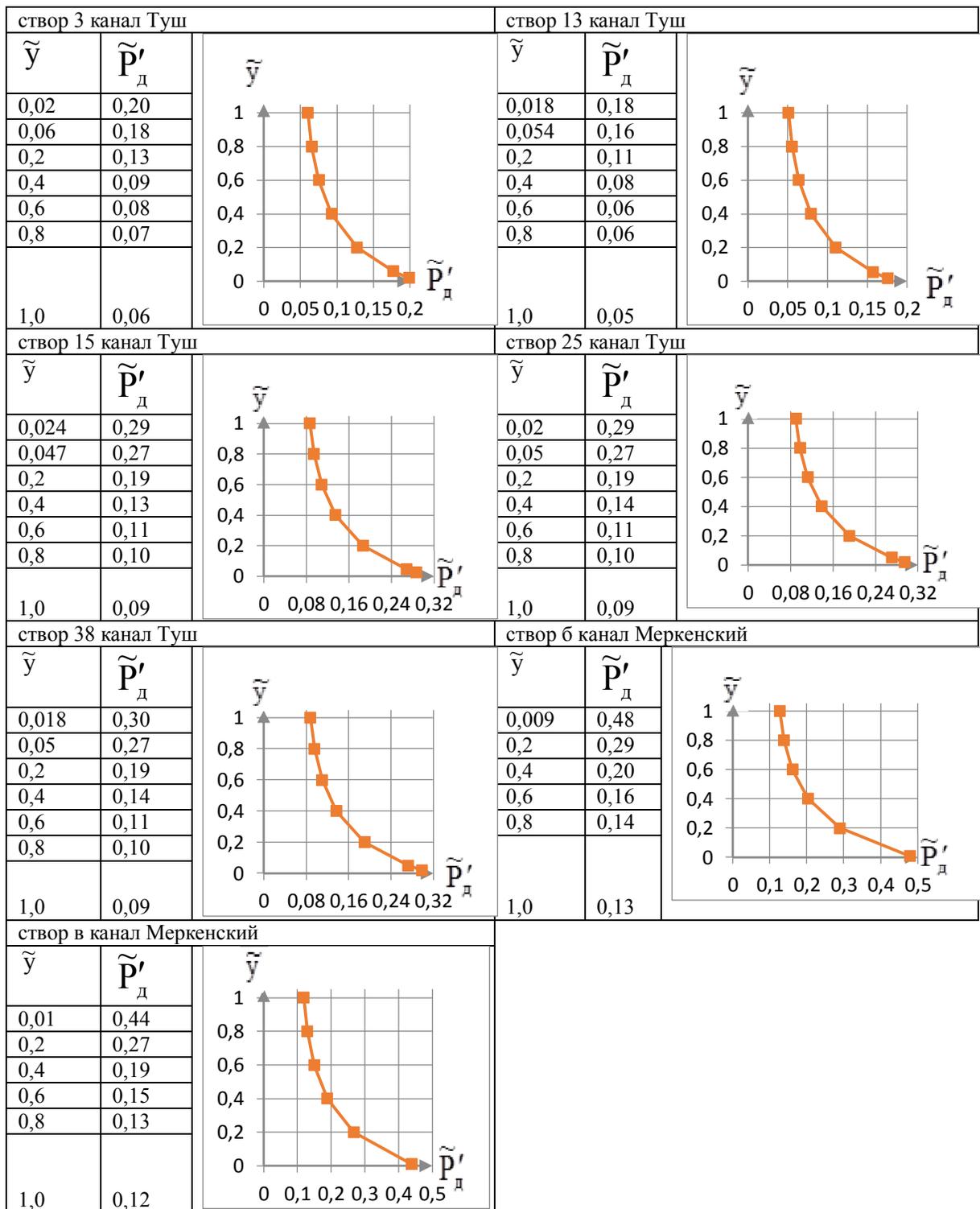


Рисунок 5 – Долевые распределения относительных значений пульсаций динамического давления по глубине открытого бурного турбулентного потока воды

Анализ результатов, приведенных на рисунке 4, позволяет установить, что традиционное распределение пульсаций динамического давления по глубине потока воды в целом похоже на распределение пульсаций продольной компоненты скорости воды. Действительно интервал изменения значений  $\tilde{P}'_{д,т}$  составляет от 1 до 0,7, а для  $\tilde{y}$  этот интервал выглядит как 0,47; 0,80; 0,94; 0,84; 0,74; 0,67; 0,65, т.е. средние значения

рассматриваемых характеристик имеют один и тот же порядок (сравни  $\sim 0,8$  и  $\sim 0,7$  соответственно для рассмотренных случаев).

Кроме того, традиционное распределение выше, чем аналогичное распределение пульсаций продольной компоненты скорости воды (минимальные значения  $\tilde{P}'_{д,т}$  значительно выше соответствующих значений для пульсаций скорости воды: сравним  $0,6$ ;  $0,7$  для первой величины и  $\sim 0,1$  для второй).

Единственное различие при этом заключается в том, что кривая  $\tilde{P}'_{д,т}(\tilde{y})$  не имеет особенностей, в то время как кривая  $\tilde{u}'(\tilde{y})$  имеет максимум. Сравнение традиционного распределения  $\tilde{P}'_{д,т}(\tilde{y})$  и распределения  $\tilde{v}'(\tilde{y})$  показывает практически полную идентичность как вида соответствующих кривых, так и их средних значений.

Анализ результатов, приведенных на рис. 5, показывает, что доля пульсационного движения (пульсаций динамического давления от значений самого динамического давления) составляет значения от  $\sim 0,2$  до  $\sim 0,05$ , что в среднем равно порядка  $0,1$ . Подобный результат получают при рассмотрении относительной доли пульсаций скорости по отношению к ее осредненным значениям [6].

Рассмотрение рис. 5 показывает, что доля пульсационного движения от осредненного для пульсаций динамического давления составляет в среднем порядка  $10\%$ ; на выступе шероховатости она порядка  $20\%$ , а при поверхностном слое потока воды – порядка  $10\%$ .

### **Заключение**

Выведены математические соотношения для (с использованием параболического профиля скорости и на примере турбулентных потоков воды на каналах Туш и Меркенский):

- распределений динамического давления и его пульсаций по глубине потока воды;
- нормы динамического давления и его пульсаций;
- относительных распределений динамического давления и его пульсаций по глубине потока воды; причем распределения пульсаций динамического давления нормированным двояким образом – по максимальному значению указанных пульсаций и по распределению динамического давления.

Установлена для рассмотренных объектов независимость от значений числа Фруда ( $Fr_{cp} = 6 \pm 1$ ) следующих характеристик:

- нормы динамического давления, заключенной в интервале от  $14$  до  $68$  кПа, среднее значение которой равно  $30 \pm 20$  кПа;
- нормы пульсаций динамического давления, заключенной в интервале от  $1,89$  до  $6,34$  кПа, среднее значение которой составила  $4 \pm 1$  кПа.

Выявлена практическая идентичность между следующими характеристиками:

- относительными традиционными распределениями пульсаций динамического давления и пульсациями продольной компоненты скорости воды;
- долевыми относительными распределениями указанных характеристик.

### **Литература**

1. Пресняков, К. А. Сравнительный анализ пульсаций динамического давления и компонент скорости в открытом турбулентном потоке воды / К. А. Пресняков, Г. К. Керимкулова, Г. О. Аскалиева // Проблемы автоматизации и управления. – 2021. – № 3(42). – С. 58-66. – EDN HQBTUN.
2. Никитин И.К. Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области. – Киев: Изд-во АН УССР, 1963.–138с.

3. Караушев А.В. Проблемы динамики естественных водных потоков. – Л.: ГИМИЗ, 1960. – 392 с.
4. Аскалиева Г.О., Пресняков К. А., Керимкулова Г.К. Модель и алгоритмы идентификации параметров открытых водотоков. – LAP LAMBERT, 2019 г., 177с.
5. Пресняков, К. А. Установление среднеинтегрального профиля скорости воды частично изученного открытого водотока на основе реконструкции эмпирических данных / К. А. Пресняков, Г. К. Керимкулова // Проблемы автоматизации и управления. – 2012. – № 2(23). – С. 47-56. – EDN WMRMRT.
6. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – Л.: Энергия (Лен. отделение), 1976.

УДК 517.977

А. Керимбеков<sup>1</sup>, [ak17@rambler.ru](mailto:ak17@rambler.ru)З.С Кабаева<sup>2</sup>, [akbar2005-78@mail.ru](mailto:akbar2005-78@mail.ru)Э.Ф. Абдылдаева<sup>3</sup>, [efa\\_69@mail.ru](mailto:efa_69@mail.ru)<sup>1</sup>Кыргызско-Российский Славянский университет, Кыргызстан, Бишкек,<sup>2</sup>Кыргызский Национальный университет имени Жусупа Баласагына, Кыргызстан, Бишкек,<sup>3</sup>Кыргызско-Турецкий университет “Манас”, Кыргызстан, Бишкек

## О СХОДИМОСТИ ПРИБЛИЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОВОГО ПРОЦЕССА

В данной статье рассмотрена задача нелинейной оптимизации теплового процесса в случае, когда функция внешнего воздействия нелинейно зависит от двумерного векторного управления и минимизируется в интегральный квадратичный функционал. На примере численных расчетов исследовано влияние отдельных параметров задачи на скорость сходимости приближенных решений к точному решению. Результаты исследований приведены в виде таблиц.

**Ключевые слова:** тепловой процесс, векторное управление, обобщенное решение, приближенное решение, скорость сходимости.

### Введение

При исследовании задачи оптимального управления системами с распределенными параметрами [1,2] не всегда удается найти точное решение задачи. В этой связи на практике ограничиваются построением приближенного решения задачи [3]. При этом немаловажное значение имеет скорость сходимости приближенного решения, которая зависит от свойств параметров задачи [4,5], например, при определении номера приближенного решения, удовлетворяющего заданную точность. Поэтому результаты исследования скорости сходимости приближений в зависимости от свойств параметров задачи могут быть полезными при решении прикладных задач.

В этой статье на примере модельной задачи приведены результаты численных расчетов, подтверждающие теоретические выводы работы [6] в случае двумерного векторного управления.

### Постановка задачи

Рассмотрим задачу нелинейной оптимизации, где требуется минимизировать интегральный квадратичный функционал

$$J[u] = \int_0^1 [V(T, x) - \xi(x)]^2 dx + \beta \int_0^T \sum_{k=1}^m u_k^2(t) dt, \quad m=1,2. \quad \beta > 0, \quad (1)$$

на множестве решений краевой задачи [5]

$$V_t = V_{xx} + g(t, x) f[t, u_1(t), u_2(t)], \quad 0 < x < 1, \quad 0 < t \leq T, \quad (2)$$

$$V(0, x) = \psi(x), \quad 0 < x < 1, \quad (3)$$

$$V_x(t, 0) = 0, \quad V_x(t, 1) + \alpha V(t, 1) = 0, \quad 0 < t \leq T, \quad \alpha > 0, \quad (4)$$

где  $u(t) = u_1(t), u_2(t) \in H^2(0, T) = H(0, T) \times H(0, T)$  – вектор функции управления;  $f[t, u_1(t), u_2(t)] \in H(0, T)$  – заданная функция внешнего воздействия, нелинейно-зависящая от вектор-функции управления, которая обладает свойством монотонности по каждой из функциональной переменной  $u_1(t), u_2(t)$ , т.е. имеет место условие

$$\frac{\partial f[t, u_1(t), u_2(t)]}{\partial u_1(t)} \neq 0, \quad \frac{\partial f[t, u_1(t), u_2(t)]}{\partial u_2(t)} \neq 0, \quad \forall t \in [0, T] \quad (5)$$

$\xi(x) \in H(0, 1)$  – заданная функция;  $\psi(x) \in H(0, 1)$  – известная функция начального состояния управляемого процесса;  $H$  – гильбертово пространство квадратично-суммируемых функций;  $T$  – фиксированный момент времени.

**Слабо обобщенное решение и условия оптимальности**

Слабо обобщенное решение краевой задачи (2) – (4) имеет вид

$$V(t, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( e^{-\lambda_n^2 t} \psi_n + \int_0^t e^{-\lambda_n^2(t-\tau)} g_n(\tau) f[\tau, u_1(\tau), \dots, u_m(\tau)] d\tau \right) z_n(x) \quad (6)$$

и является элементом гильбертова пространства  $H(Q)$  [5].

Согласно принципу максимума, для распределенных систем приращение функционала вычисляется по формуле

$$\Delta J[u(t)] = J[u(t) + \Delta u(t)] - J[u(t)],$$

где  $\Delta u(t)$  – произвольное приращение, для которого  $u(t) + \Delta u(t)$  является элементом пространства  $H^2(0, T)$ . Согласно методике работы [2], приращение функционала  $\Delta J[u(t)]$  непосредственным вычислением приводим к виду

$$\Delta J[u(t)] = - \int_0^T \Delta \Pi[t, \omega(t, x), u(t)] dt + \int_0^1 \Delta V^2(T, x) dx, \quad (7)$$

где

$$\Pi[t, \omega(t, x), u(t)] = \int_0^1 \omega(t, x) g(t, x) f[t, u_1(t), u_2(t)] dx - \beta \sum_{k=1}^m u_k^2(t), \quad m = 1, 2, \quad (8)$$

$$\Delta \Pi[t, \omega(t, x), u(t)] = \Pi[t, \omega(t, x), u(t) + \Delta u(t)] - \Pi[t, \omega(t, x), u(t)], \quad (9)$$

$\omega(t, x)$  – удовлетворяет условиям

$$\omega_t + \omega_{xx} = 0, \quad 0 < x < 1, \quad 0 < t \leq T, \quad (10)$$

$$\omega(T, x) + 2[V(T, x) - \xi(x)] = 0, \quad 0 < x < 1,$$

$$\omega_x(t, 1) = 0, \quad \omega_x(t, 1) + \alpha \omega(t, 1) = 0, \quad \alpha > 0, \quad 0 < t \leq T.$$

Согласно необходимому условию экстремума 1-го порядка, имеем систему равенств

$$\int_0^1 g(t, x) \omega(t, x) dx \frac{\partial f[t, u_1(t), u_2(t)]}{\partial u_k} - 2\beta u_k(t) = 0, \quad k = 1, 2, \quad (11)$$

Согласно необходимому условию экстремума 2-го порядка, матрица Гесса

$$\Gamma \Pi \cdot, u_1 t, u_2 t = \begin{pmatrix} -2\beta f_{u_1} \left( \frac{u_1}{f_{u_1}} \right)_{u_1} & -2\beta f_{u_1} \left( \frac{u_1}{f_{u_1}} \right)_{u_2} \\ -2\beta f_{u_m} \left( \frac{u_m}{f_{u_2}} \right)_{u_1} & -2\beta f_{u_2} \left( \frac{u_m}{f_{u_m}} \right)_{u_2} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

должна быть отрицательно-определенной, т.е., согласно критериям Сильвестра, требуется выполнение следующих условий

$$f_{u_1} \left( \frac{u_1}{f_{u_1}} \right)_{u_1} > 0, \quad \begin{vmatrix} -2\beta f_{u_1} \left( \frac{u_1}{f_{u_1}} \right)_{u_1} & -2\beta f_{u_1} \left( \frac{u_1}{f_{u_1}} \right)_{u_2} \\ -2\beta f_{u_2} \left( \frac{u_2}{f_{u_2}} \right)_{u_1} & -2\beta f_{u_2} \left( \frac{u_2}{f_{u_2}} \right)_{u_2} \end{vmatrix} = -2\beta^2 f_{u_1} f_{u_2} \begin{vmatrix} \left( \frac{u_1}{f_{u_1}} \right)_{u_1} & \left( \frac{u_1}{f_{u_1}} \right)_{u_2} \\ \left( \frac{u_2}{f_{u_2}} \right)_{u_1} & \left( \frac{u_2}{f_{u_2}} \right)_{u_2} \end{vmatrix} > 0. \quad (13)$$

При выполнении условий (13) функция  $\Pi \cdot, u_1 t, u_2 t$  достигает своего максимума при наборе управлений  $u_1 t, u_2 t$ , удовлетворяющих систему равенств (11). Соотношения (11) и (13) называются **условиями оптимальности**.

Функция  $\omega(t, x)$  определяется как слабо обобщенное решение, сопряженной краевой задачей (10,) и имеет вид

$$\omega(t, x) = -2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ e^{-\lambda_n^2 t} \psi_n + \int_0^T e^{-\lambda_n^2 (T-\tau)} g_n \tau f[\tau, u_1 \tau, u_2 \tau] d\tau - \xi_n \right] e^{-\lambda_n^2 (T-t)} z_n(x). \quad (14)$$

Непосредственным вычислением легко проверить, что эта функция является элементом пространства  $H Q$ .

### Система нелинейных интегральных уравнений оптимальных управлений

Элементы оптимального векторного управления  $u(t) = u_1(t), u_2(t)$  удовлетворяют системе равенств (11). Вместо функции  $\omega(t, x)$ , подставляя ее значение (14), относительно элементов векторного управления  $u(t) = u_1(t), u_2(t)$ , имеем систему равенств

$$\beta u_k t = \frac{\partial f[t, u_1(t), u_2(t)]}{\partial u_k} \sum_{n=1}^{\infty} G_n T, t \left[ h_n - \int_0^T G_n T, \tau f[\tau, u_1(\tau), u_2(\tau)] d\tau \right], \quad (15)$$

где

$$G_n T, t = g_n(t) e^{-\lambda_n^2 (T-t)}, \quad h_n = \xi_n - e^{-\lambda_n^2 T} \psi_n, \quad k = 1, 2.$$

Система равенств (15) обладает специфическим свойством, в частности, оно удовлетворяет системе равных соотношений, т.е.

$$\beta u_1 t = \frac{\partial f}{\partial u_1} = \frac{\partial f}{\partial u_2}, \quad (16)$$

где  $\mathcal{Y} t$  – некоторая функция.

Заметим, что в силу монотонности функции  $f t, u_1, u_2$  по каждой функциональной переменной  $u_1 t, u_2 t$  и, согласно условию оптимальности (13), из систем равенств (16) каждая из функций  $u_1 t, u_2 t$  однозначно выражается через функцию  $\mathcal{Y} t$ , т.е. имеет место следующая система равенств

$$\begin{aligned} u_1 t &= \varphi_1 [t, \mathcal{Y} t, \beta], \\ u_2 t &= \varphi_2 [t, \mathcal{Y} t, \beta]. \end{aligned} \tag{17}$$

Тогда на основе соотношений (16) и (17) из (15) относительно функции  $\mathcal{Y} t$  имеем следующее соотношение

$$\mathcal{Y} t + \sum_{n=1}^{\infty} G_n T, t \int_0^T G_n t, \tau f [\tau, \varphi_1 [\tau, \mathcal{Y} \tau, \beta], \varphi_2 [\tau, \mathcal{Y} \tau, \beta]] d\tau = \sum_{n=1}^{\infty} G_n T, t h_n,$$

которое является нелинейным интегральным уравнением.

Это уравнение перепишем в операторной форме

$$\mathcal{Y} t = G [\mathcal{Y} t], \tag{18}$$

где

$$\begin{aligned} G [\mathcal{Y} t] &= \sum_{n=1}^{\infty} G_n T, t \left[ h_n - \int_0^T G_n T, \tau f [\tau, \varphi_1 [\tau, \mathcal{Y} \tau, \beta], \varphi_2 [\tau, \mathcal{Y} \tau, \beta]] d\tau \right] = \\ &= h(t) + G_0 [\mathcal{Y} t] \end{aligned}$$

Доказано, что операторное уравнение (18) в пространстве  $H^2 0, T$  имеет единственное решение и найдены достаточные условия существования решения [6,7].

Решение операторного уравнения (18) находим методом последовательных приближений.

$$\mathcal{Y}_i t = G [\mathcal{Y}_{i-1} t], \quad i = 1, 2, 3, \dots,$$

где  $\mathcal{Y}_0 t$  – произвольный элемент пространства  $H(0, T)$ . Известно [8], что приближенное решение  $\mathcal{Y}_i t$  удовлетворяет оценке

$$\|\mathcal{Y} t - \mathcal{Y}_i t\|_H \leq \frac{\gamma^i}{1-\gamma} \|G [\mathcal{Y}_0 t] - \mathcal{Y}_0 t\|_H. \tag{19}$$

В силу произвольности если положить  $\mathcal{Y}_0 t = h t$ , то неравенством (19) можно пользоваться в следующем виде

$$\|\mathcal{Y} t - \mathcal{Y}_i t\|_H \leq \frac{\gamma^i}{1-\gamma} \|G_0 [\mathcal{Y}_0 t]\|_H. \tag{20}$$

Точное решение операторного уравнения (18) находим по формуле

$$\mathcal{Y}^0 t = \lim_{i \rightarrow \infty} \mathcal{Y}_i t, \quad \mathcal{Y}_i t = G [\mathcal{Y}_{i-1} t], \quad i = 1, 2.$$

где  $\vartheta_i^t$  – последовательные приближения.

Далее, найденное решение уравнения (18) подставим в (17) и находим решение системы (15), т.е. оптимальное векторное управление  $u^0(t)$  определим по формулам:

$$\begin{aligned} u_1^0 t &= \varphi_1 [t, \vartheta^0 t, \beta], \\ u_2^0 t &= \varphi_2 [t, \vartheta^0 t, \beta], \end{aligned} \tag{21}$$

После того как было найдено векторное оптимальное управление  $u^0(t)$ , решение задачи оптимизации находим в виде тройки  $u^0 t, V^0 t, x, J[u^0(t)]$  по формулам

$$V^0 t, x = \sum_{n=1}^{\infty} \left( e^{-\lambda_n^2 t} \psi_n + \int_0^t e^{-\lambda_n^2(t-\tau)} g_n \tau f[\tau, u_1^0(\tau), u_2^0(\tau)] d\tau \right) z_n(x) \tag{22}$$

– оптимальный процесс,

$$J[u^0 t] = \int_0^1 [V^0(T, x) - \xi(x)]^2 dx + \beta \int_0^T \sum_{k=1}^m u_k^0 t^2 dt, \quad m = 1, 2. \tag{23}$$

– минимальное значение функционала.

**Приближенное решение задачи нелинейной оптимизации и его сходимости**

Для построения приближенного оптимального управления  $s$ -е приближение решения интегрального уравнения (18) подставим в (17). Тогда  $s$ -е приближение  $u^s t = u_1^s t, u_2^s t$  векторного оптимального управления  $u^0 t$  определяется по формулам

$$u_k^s t = \varphi_k [t, \vartheta^s t, \beta], \quad k = 1, 2, \quad s = 0, 1, 2, 3, \dots \tag{24}$$

Доказано, что  $s$ -е приближение оптимального управления удовлетворяет оценке

$$\|u^0 t - u^s t\|_{H^m} \leq \sqrt{\sum_{k=1}^m \varphi_k^0 \beta^2 \frac{\gamma^s}{1-\gamma}} \|G[\vartheta_0 t] - \vartheta_0 t\|_{H^2} \tag{25}$$

и сходится к оптимальному управлению  $u^0(t)$  по норме пространства  $H^2(0, T)$ .

Приближенное векторное управление  $u^s t$ , подставляя в (6), находим  $s$ -е приближение  $V_s^0 t, x$  оптимального процесса  $V^0(t, x)$ , т.е.

$$V_s^0 t, x = \sum_{n=1}^{\infty} \left( e^{-\lambda_n^2 t} \psi_n + \int_0^t e^{-\lambda_n^2(t-\tau)} g_n \tau f[\tau, u_1^s(\tau), u_2^s(\tau)] d\tau \right) z_n(x).$$

Доказано, что  $s$ -е приближение оптимального процесса удовлетворяет оценке

$$\|V^0 t, x - V_s^0 t, x\|_{H^Q} \leq \sqrt{T \left( \frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{6} \right)} \|g t, x\|_{H^m} m f_0 \varphi_0 \beta \frac{\gamma^s}{1-\gamma} \|G[\vartheta_0 t] - \vartheta_0 t\|_{H^2} \tag{26}$$

и сходится к оптимальному процессу  $V^0(t, x)$  по норме пространства  $H(Q)$ .

Поскольку  $V_s^0(t, x)$  определяется как сумма бесконечного функционального ряда, то ее не всегда удастся найти. Поэтому на практике целесообразно использовать приближение вида

$$V_s^r(t, x) = \sum_{n=1}^r \left[ e^{-\lambda_n^2 t} \psi_n + \int_0^t e^{-\lambda_n^2(t-\tau)} g_n(\tau) f[\tau, u_1^s(\tau), u_2^s(\tau)] d\tau \right] z_n(x),$$

которое назовем конечномерным  $S, r$ -м приближением оптимального процесса.

Доказано, что  $S, r$ -е приближение оптимального процесса при  $r \rightarrow \infty$  сходится к функции  $V_s^0(t, x)$  по норме пространства  $H(Q)$  при  $m$  значений  $s=1, 2, 3, \dots$

Доказано, что  $S, r$ -е приближение оптимального процесса при  $S, r \rightarrow \infty$  сходится к функции  $V^0(t, x)$  по норме пространства  $H(Q)$ .

Поскольку оптимальный процесс имеет приближения  $V_s^0(t, x)$  и  $V_s^r(t, x)$ , то будем различать два вида приближенного значения функционала (1). Значение функционала, вычисленное с учетом  $S$ -го приближения оптимального процесса, вычислим по формуле

$$J_s[u^s(t)] = \int_0^1 [V_s^0(T, x) - \xi(x)]^2 dx + \beta \int_0^T u_1^s(t)^2 + u_2^s(t)^2 dt, \quad \beta > 0 \quad (27)$$

и назовем  $S$ -м приближенным значением функционала.

Значение функционала, вычисленное с учетом  $S, r$ -го приближения оптимального процесса, вычислим по формуле

$$J_s^r[u^s(t)] = \int_0^1 [V_s^r(T, x) - \xi(x)]^2 dx + \beta \int_0^T u_1^s(t)^2 + u_2^s(t)^2 dt, \quad \beta > 0 \quad (28)$$

и назовем  $S, r$ -м приближенным значением функционала.

Доказано, что  $S$ -е приближенное значение функционала удовлетворяет оценке

$$\begin{aligned} & |J[u^0] - J_s[u^s]| \leq \\ & \leq \left( C_1 \sqrt{T \left( \frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{6} \right)} \|g(t, x)\|_H m f_0 \varphi_0 \beta + C_2 \sqrt{\sum_{k=1}^m \varphi_k^0 \beta^2} \right) \frac{\gamma^s}{1-\gamma} \|G[\mathcal{G}_0(t)] - \mathcal{G}_0(t)\|_H, \end{aligned} \quad (29)$$

где  $C_1, C_2$  – положительные постоянные, и сходится к точному значению функционала  $J[u^0]$ .

Доказано, что  $S$ -е приближенное значение функционала удовлетворяет оценке

$$|J_s[u^s] - J_s^r[u^s]| \leq 2C_3 T \left( M \sum_{n=r+1}^{\infty} \psi_n^2 + M \sum_{n=r+1}^{\infty} \int_0^T g_n^2(\tau) d\tau \int_0^T f[\tau, u_1^s(\tau), u_2^s(\tau)] d\tau \right), \quad (30)$$

где  $C_3$  – положительное постоянное, и сходится к точному значению функционала  $J_s[u^s]$ .

Доказано, что  $S, r$ -е приближенное значение функционала при  $S, r \rightarrow \infty$  сходится к точному значению функционала  $J[u^0]$ .

**Пример.** Для подтверждения вышеприведенных теоретических выводов рассмотрим модельный пример, где численные расчеты составлены с использованием программы MATLAB при следующих данных

$$T=2, \quad \xi(x)=1+x, \quad g(t,x)=tx, \quad f[t,u_1(t),u_2(t)] = e^{-u_1^2 t} + e^{1-u_2^2 t},$$

$$\psi_1(x)=1-x, \quad 0 < x < 1, \quad 0 < t \leq 2,$$

т.е. требуется минимизировать функционал

$$J[u(t)] = \int_0^1 [V(2,x) - 1+x]^2 dx + \beta \int_0^2 u_1^2(t) + u_2^2(t) dt, \quad \beta > 0, \quad (31)$$

на множестве решений краевой задачи

$$V_t = V_{xx} + tx e^{-u_1^2 t} + e^{1-u_2^2 t}, \quad 0 < x < 1, \quad 0 < t \leq 2, \quad (32)$$

$$V(0,x) = 1-x, \quad 0 < x < 1, \quad (33)$$

$$V_x(t,0) = 0, \quad V_x(t,1) + \alpha V(t,1) = 0, \quad 0 < t \leq 2, \quad \alpha > 0, \quad (34)$$

$u_1(t), u_2(t) \in H^2(0,2) = H(0,2) \times H(0,2)$  – вектор функции управления;  $H$  – гильбертово пространство.

Слабо обобщенное решение краевой задачи управляемого процесса находим по формуле (5).

Условия, обеспечивающие монотонности функции  $f[t, u_1(t), u_2(t)]$ , выполняются, т.е.

$$\frac{\partial f[t, u_1(t), u_2(t)]}{\partial u_1(t)} = -2u_1(t) e^{-u_1^2 t} \neq 0, \quad \frac{\partial f[t, u_1(t), u_2(t)]}{\partial u_2(t)} = -2u_2(t) e^{1-u_2^2 t} \neq 0. \quad (35)$$

Функция принципа максимума имеет вид

$$P[t, \omega(t,x), u(t)] = \int_0^1 \omega(t,x) g(t,x) dx e^{-u_1^2 t} + e^{1-u_2^2 t} - \beta (u_1^2(t) + u_2^2(t)). \quad (36)$$

Первое условие оптимальности определяется следующими соотношениями

$$\int_0^1 g(t,x) \omega(t,x) dx - 2u_1(t) e^{-u_1^2 t} - 2\beta u_1(t) = 0$$

$$\int_0^1 g(t,x) \omega(t,x) dx - 2u_2(t) e^{1-u_2^2 t} - 2\beta u_2(t) = 0 \quad (37)$$

$$f_{u_1} \left( \frac{u_1}{f_{u_1}} \right)_{u_1} = -2u_1(t) e^{-u_1^2 t} \left( \frac{u_1(t)}{-2u_1(t) e^{-u_1^2 t}} \right)_{u_1} =$$

$$= -2u_1(t) e^{-u_1^2 t} \left( \frac{e^{u_1^2 t}}{-2} \right)_{u_1} = 2u_1^2(t) e^{-u_1^2 t} e^{u_1^2 t} = 2u_1^2(t) > 0$$

$$\left| \begin{array}{cc} -2\beta f_{u_1} \left( \frac{u_1}{f_{u_1}} \right)_{u_1} & -2\beta f_{u_1} \left( \frac{u_1}{f_{u_1}} \right)_{u_2} \\ -2\beta f_{u_2} \left( \frac{u_2}{f_{u_2}} \right)_{u_1} & -2\beta f_{u_2} \left( \frac{u_2}{f_{u_2}} \right)_{u_2} \end{array} \right| = -2\beta^2 \left| \begin{array}{cc} \left( \frac{u_1}{f_{u_1}} \right)_{u_1} & \left( \frac{u_1}{f_{u_1}} \right)_{u_2} \\ \left( \frac{u_2}{f_{u_2}} \right)_{u_1} & \left( \frac{u_2}{f_{u_2}} \right)_{u_2} \end{array} \right| =$$

$$= 4\beta^2 \left| \begin{array}{cc} 2u_1^2(t) & 0 \\ 0 & 2u_2^2(t) \end{array} \right| = 16\beta^2 u_1^2(t) u_2^2(t) > 0 \quad (38)$$

Первое условие оптимальности имеет вид

$$\begin{aligned}
 \beta e^{u_1^2 t} &= \sum_{n=1}^{\infty} g_n(t) \omega_n(t) = \\
 &= -2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ e^{-\lambda_n^2 T} \psi_n + \int_0^T e^{-\lambda_n^2 (T-\tau)} g_n(\tau) f[\tau, u_1(\tau), u_2(\tau)] d\tau - \xi_n \right] e^{-\lambda_n^2 (T-t)} g_n(t) \\
 \beta e^{u_2^2 t-1} &= \sum_{n=1}^{\infty} g_n(t) \omega_n(t) = \\
 &= -2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ e^{-\lambda_n^2 T} \psi_n + \int_0^T e^{-\lambda_n^2 (T-\tau)} g_n(\tau) f[\tau, u_1(\tau), u_2(\tau)] d\tau - \xi_n \right] e^{-\lambda_n^2 (T-t)} g_n(t)
 \end{aligned} \tag{39}$$

Поскольку, согласно (38), второе условие оптимальности выполняется для любых управлений  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$ , в частности и для оптимальных управлений  $u_1^0(t)$  и  $u_2^0(t)$ , то векторное оптимальное управление  $u^0(t) = u_1^0(t), u_2^0(t)$  определяется как решение системы нелинейных интегральных уравнений (11).

Для системы (11) выписываем соотношение равных отношений вида

$$\vartheta(t) = -\frac{\beta}{2} e^{u_1^2 t} = -\frac{\beta}{2} e^{u_2^2 t-1}$$

Отсюда имеем следующие равенства

$$\begin{aligned}
 u_1(t) = \varphi_1[t, \vartheta(t), \beta] &= \pm \sqrt{\ln\left(-\frac{2\vartheta(t)}{\beta}\right)}, & \left( u_1^2(t) = \ln\left(-\frac{2\vartheta(t)}{\beta}\right) \right) \\
 u_2(t) = \varphi_2[t, \vartheta(t), \beta] &= \pm \sqrt{\ln\left(-\frac{2\vartheta(t)}{\beta}\right) + 1}, & \left( u_2^2(t) = \ln\left(-\frac{2\vartheta(t)}{\beta}\right) + 1 \right)
 \end{aligned} \tag{40}$$

Согласно равенствам (39) и (40) относительно функции  $\vartheta(t)$ , имеем интегральное уравнение следующего вида

$$\vartheta(t) = -2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ e^{-\lambda_n^2 T} \psi_n + \int_0^T e^{-\lambda_n^2 (T-\tau)} g_n(\tau) \left( -\frac{2\vartheta}{\beta} - \frac{2\vartheta}{\beta} \right) d\tau - \xi_n \right] e^{-\lambda_n^2 (T-t)} g_n(t).$$

Это уравнение перепишем в виде

$$\vartheta(t) - \frac{8}{\beta} \sum_{n=1}^{\infty} G_n(T, t) \int_0^T G_n(T, \tau) \vartheta(\tau) d\tau = 2 \sum_{n=1}^{\infty} G_n(T, t) h_n, \tag{41}$$

где  $G_n(T, t) = g_n(t) e^{-\lambda_n^2 (T-t)}$ ,  $h_n = \xi_n - e^{-\lambda_n^2 T} \psi_n$ .

Уравнение (41) является линейным интегральным уравнением Фредгольма 2-го рода, и его приближенное решение  $\vartheta_i(t)$  удовлетворяет оценке

$$\|\vartheta(t) - \vartheta_i(t)\|_H \leq \frac{\gamma^i}{1-\gamma} \|G_0(h(t))\|_H. \tag{42}$$

$$g_0^2 = 0.03.$$

Элементы векторного оптимального управления  $u^0(t)$  определим по формулам:

$$\begin{aligned}
 u_1^0(t) &= \varphi_1[t, \vartheta^0(t), \beta] = \pm \sqrt{\ln\left(-\frac{2\vartheta^0(t)}{\beta}\right)}, \\
 u_2^0(t) &= \varphi_2[t, \vartheta^0(t), \beta] = \pm \sqrt{\ln\left(-\frac{2\vartheta^0(t)}{\beta}\right) + 1},
 \end{aligned}
 \tag{43}$$

После этого, зная оптимальное управление  $u^0(t)$ , полное решение задачи нелинейной оптимизации находим в виде тройки  $u^0(t), V^0(t, x), J[u^0(t)]$ ,

$$\text{где } V^0(t, x) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\lambda_n^2 T} \psi_n + \int_0^t e^{-\lambda_n^2(t-\tau)} g_n(\tau) \left( e^{-u_1^0(\tau)^2} - e^{-u_2^0(\tau)^2} \right) d\tau \Big] z_n(x).
 \tag{44}$$

– оптимальный процесс,

$$J[u^0(t)] = \int_0^T [V^0(T, x) - \xi(x)]^2 dx + \beta \int_0^T \sum_{i=1}^m u_i^0(t)^2 dt,
 \tag{45}$$

– минимальное значение функционала.

Далее  $s$ -е приближение полного решения задачи нелинейной оптимизации находим в виде тройки  $u^s(t), V_s^0(t, x), J_s[u^s(t)]$ ,

где

$$\begin{aligned}
 u_1^s(t) &= \varphi_1[t, \vartheta^s(t), \beta] = \pm \sqrt{\ln\left(-\frac{2\vartheta^s(t)}{\beta}\right)}, \\
 u_2^s(t) &= \varphi_2[t, \vartheta^s(t), \beta] = \pm \sqrt{\ln\left(-\frac{2\vartheta^s(t)}{\beta}\right) + 1},
 \end{aligned}$$

;

$$V_s^0(t, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ e^{-\lambda_n^2 t} \psi_n + \int_0^t e^{-\lambda_n^2(t-\tau)} g_n(\tau) \left( e^{-u_1^s(\tau)^2} - e^{-u_2^s(\tau)^2} \right) d\tau \right] z_n(x).$$

.

$$J_s[u^s(t)] = \int_0^T [V_s^0(T, x) - \xi(x)]^2 dx + \beta \int_0^T \sum_{i=1}^m u_i^s(t)^2 dt,$$

Численные расчеты, где была отражена зависимость скорости сходимости приближенного решения от свойств параметров задачи нелинейной оптимизации как по оптимальному управлению, так и по оптимальному процессу, были опубликованы в работе [8]. При этом были использованы отдельные численные результаты.

В этой статье рассмотрены вопросы влияния свойств параметров задачи нелинейной оптимизации на скорость сходимости приближений минимального значения функционала. При этом были использованы отдельные численные результаты работы [8]. Вычисления проводились для следующих оценок:

1. Для  $s$ -го приближения:

$$|J[u^0] - J_s[u^s]| = C_1 \|V^0(T, x) - V_s^0(T, x)\|_{H^1} + C_2 \|u^0(t) - u^s(t)\|_{H^2} \rightarrow 0,$$

где  $C_1 > 0, C_2 > 0$ .

2. Для  $r$ -го приближения, которое справедливо при каждом фиксированном  $s = 1, 2, 3, \dots$ .

$$|J_s[u^s] - J_s^r[u^s]| \leq C_3 \|V_s^0(T, x) - V_s^r(T, x)\|_H \rightarrow 0, \quad C_3 = const$$

3. Для конечномерного приближения.

$$|J[u^0] - J_s^r[u^s]| \leq |J[u^0] - J_s[u^s]| + |J_s[u^s] - J_s^r[u^s]| \rightarrow 0$$

4. Численный анализ сходимости приближений минимального значения функционала

Таблица 1. Сходимость значений промежуточных приближений к минимальному значению функционала

	$ J[u^0] - J_s[u^s]  \leq C_1 \ V^0(T, x) - V_s^0(T, x)\ _H + C_2 \ u^0 - u^s\ _H^m$		
s	$\alpha = 1/2$	$\alpha = 1$	$\alpha = 3/2$
1	204.0393	33.4854	15.2868
2	109.2513	10.8418	3.8828
3	58.4978	3.5103	0.98621
4	31.3222	1.1366	0.25049
5	16.7712	0.36799	0.063625
6	8.98	0.11915	0.01616
7	4.8083	0.038577	0.0041047
8	2.5746	0.01249	0.0010426
9	1.3785	0.004044	0.00026481
10	0.73812	0.0013094	6.726e-005

Численные результаты показывают, что скорость сходимости значений промежуточных приближений к минимальному значению функционала зависит от значения параметра  $\alpha$ . С ростом значений параметра  $\alpha$  скорость сходимости ощутимо увеличивается. Например, при  $s=7$  точность  $\epsilon$ , равного 0,1, достигается для значения  $\alpha=1$ , а это точность для значения  $\alpha=1,5$  достигается при  $s=5$  и т.д.

Таблица 2. Сходимость значений точных приближений к промежуточному приближению минимального значения функционала

	$ J_s[u^s] - J_s^r[u^s]  \leq C_3 \ V_s^0(T, x) - V_s^r(T, x)\ _H$		
r	$\alpha = 1/2$	$\alpha = 1$	$\alpha = 3/2$
1	19.1614	17.6621	17.085
10	5.7232	5.4515	5.3494
100	1.7892	1.7892	1.6796

1000	0.565	0.53999	0.53062
10000	0.17864	0.17074	0.16778
100000	0.056491	0.053992	0.053056
1000000	0.017864	0.017074	0.016778
10000000	0.0056491	0.0053992	0.0053056
100000000	0.0017864	0.0017074	0.0016778
1000000000	0.00056491	0.00053992	0.00053056

Численные результаты этой таблицы показывают, что скорость сходимости значений промежуточных приближений к минимальному значению функционала зависит от значения параметра  $\alpha$ . С ростом значений параметра  $\alpha$  скорость сходимости увеличивается, но очень медленно.

Таблица 3. Сходимость значений точных приближений к минимальному значению функционала

$s$	$ J[u^0] - J_s^r[u^s]  \leq  J[u^0] - J_s[u^s]  +  J_s[u^s] - J_s^r[u^s] $			
	$r = 1$	$r = 10$	$r = 100$	$r = 1000$
1	32.3718	20.6362	16.9664	15.8174
2	20.9678	9.2322	5.5624	4.4134
3	18.0712	6.3356	2.6658	1.5168
4	17.3355	5.5999	1.9301	0.78111
5	17.1487	5.413	1.7432	0.59424
6	17.1012	5.3655	1.6958	0.54678
7	17.0891	5.3535	1.6837	0.53472
8	17.0861	5.3504	1.6807	0.53166
9	17.0853	5.3496	1.6799	0.53088
10	17.0851	5.3495	1.6797	0.53068

Приведенные здесь численные результаты показывают изменения скорости сходимости промежуточных приближений к минимальному значению функционала при фиксированном значении одного из индексов  $s$  и  $r$ .

Анализ численных результатов, приведенных в таблицах, показывает, что скорость сходимости значений промежуточных приближений к минимальному значению функционала зависит от значения параметра  $\alpha$ , и с ростом значений параметра  $\alpha$  скорость сходимости увеличивается.

### **Заключение**

Установлено, что скорость сходимости приближений функционала к точному значению существенно зависит от значений параметра  $\alpha$ . Аналогично можно показать зависимость скорости сходимости от других параметров задачи. Отметим, что одной из особенностей рассматриваемой задачи является то обстоятельство, что компоненты векторного оптимального управления определяются с использованием свойства равных отношений, который имеет место только для задач нелинейной оптимизации в случае, когда скалярная функция внешнего воздействия нелинейно зависит от векторного управления.

### **Литература**

1. Егоров А.И., Знаменская Л.Н. Введение в теорию управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 2017. – 288с.
2. Егоров А.И. Оптимальное управление тепловыми и диффузными процессами. – М.: Наука, 1974. – 486с.
3. Akylbek Kerimbekov, Elmira Abdylbaeva. Optimal Distributed Control for the processes of Oscillation Described by Fredholm Integro-Differential Equations. Eurasian Mathematical Journal Dergisi, 6(2), 2015. ISSN 2077-9879. 18–40 pp.
4. Elmira Abdylbaeva, Zarina Kabaeva, and Kubat Karabakirov. Numerical analysis of convergence rate of approximation solutions to boundary value problem for oscillation processes. Third International Conference of Mathematical Sciences (ICMS 2019). Istanbul, Turkey. 4-8 September, 2019. AIP Conference Proceedings 2183.070005. (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5136167>.
5. Керимбеков, А. К. Приближенное решение задачи нелинейной оптимизации упругих колебаний при точечном управлении / А. К. Керимбеков, У. Э. Дуйшеналиева // Проблемы автоматизации и управления. – 2016. – № 2(31). – С. 57-62. – EDN XIAAIF.
6. Керимбеков А., Кабаева З.С. Решение задачи оптимизации теплового процесса при нелинейно входящем векторном управлении. //Proceedings VI International Scientific conference. Part I(Sections1,2,3,4). Aktobe's K.Zhubanov State University 14-17 October 2012. Aktobe, s.100–104.
7. Керимбеков А., Кабаева З.С. Приближенное решение задач нелинейной оптимизации тепловых процессов. // Научный журнал. МОиН, Казахская Республика, Изденис №1/2009. – Алматы. –С. 196–200.
8. Кабаева З.С. О влиянии значения параметров на скорость сходимости приближенного решения задачи оптимального управления тепловым процессом. //Наука, новые технологии и ии инновации Кыргызстана. – №5. – 2017. – Бишкек. – С. 166–170.

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

---

УДК 004

*С.Н. Верзунов, [verzunov@hotmail.com](mailto:verzunov@hotmail.com)*

*Институт машиноведения и автоматизации НАН КР*

### **ДИАГНОСТИКА РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПНЕВМОНИИ ПО РЕНТГЕНОВСКИМ СНИМКАМ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ**

Продолжающаяся вспышка и распространение вируса COVID-19 в 2020-2022 году послужили толчком для решения ряда биомедицинских проблем. Развитие алгоритмов машинного обучения предоставляет широкие возможности в области автоматизации решения такого рода задач. В настоящей работе рассматривается подробная классификация пневмонии на вирусную, бактериальную и вызванную туберкулёзом. Всего выделяется 6 классов. В результате исследований было подтверждено, что рентгеновские снимки грудной клетки могут иметь большое значение для постановки диагноза пациентам с COVID-19 и также могут быть полезны для диагностики различных видов пневмонии, разработана архитектура нейронной сети для диагностики заболеваний легких. Разработан прототип мобильного приложения для диагностики различных видов пневмонии, который используется для тестирования и усовершенствования разработанной системы.

**Ключевые слова:** классификация изображений, нейронная сеть, CNN, различные виды пневмонии, мобильное приложение.

#### **Введение**

Внезапная вспышка и распространение вируса COVID-19 в 2020 году послужили толчком для решения ряда биомедицинских задач, в том числе проблем распознавания снимков и функциональной диагностики легких. Функциональная диагностика представляет собой раздел диагностики, содержанием которого являются объективная оценка, обнаружение отклонений и установление степени нарушений функции различных органов и физиологических систем организма на основе измерения физических, химических или иных объективных показателей их деятельности с помощью инструментальных или лабораторных методов исследования.

Развитие алгоритмов машинного обучения предоставляет широкие возможности в области автоматизации решения биомедицинских задач. Компьютерная обработка биомедицинских изображений повышает точность анализа изображений, снижает роль человеческого фактора при принятии решений, позволяет оценить эффективность применения терапии и в целом улучшает качество жизни людей. Активно развиваются биомедицинские исследования в области анализа и распознавания изображений, полученных при функциональной диагностике [1].

В [2] отмечено, что технологии, основанные на искусственном интеллекте (ИИ), включая машинное обучение, распознавание изображений и алгоритмы глубокого обучения, могут быть использованы для раннего обнаружения и диагностики инфекции COVID-19.

Описана алгоритмизация процесса распознавания состояний на основе специальных рентгеновских изображений в [3]. Предложен метод нейросетевого анализа. Для этого была реализована нейронная сеть, которая имеет возможность самообучаться. Использовались методы опорных векторов и дискриминантный анализ для сведения к минимуму вероятности ошибки экспертной системы.

Рассмотрены различные подходы машинного обучения в [4], используемые при прогнозировании распространения заболеваемости, и прогнозировании состояния пациентов при вирусе COVID-19. Отмечается, что в последние годы анализ медицинских изображений является одним из наиболее перспективных направлений исследования. Описываются наиболее широко известные алгоритмы для машинного обучения – случайный лес (Random Forest, RF) и машина опорных векторов (SVM); для глубокого обучения – сверточная нейронная сеть (CNN), длинная кратковременная память (LSTM),

генеративные состязательные сети (GAN), остаточная нейронная сеть (Residual Neuralnetwork, ResNet), автоенкодер. Также отмечается, что были использованы математические и статистические модели при оценке человеческих потерь, а также в прогнозировании общего количества смертей до определенного периода или конца пандемии.

В настоящей работе рассматривается подробная классификация пневмонии на вирусную, бактериальную и вызванную туберкулёзом. Так, выделяется 6 классов: COVID-19, норма, бактериальная пневмония, вирусная пневмония, туберкулёз и отдельный класс для заболеваний невыясненной природы, который мы для краткости назовем «затемнение легких». К сожалению, здесь также для большинства пациентов имеется только одномоментный набор рентгеновских снимков грудной клетки. Это ограничение приводит к тому, что оказывается невозможным определить, появились ли у пациентов рентгенологические особенности по мере прогрессирования болезни.

#### **Аппаратное и программное обеспечение исследований**

Для проведения вычислительных экспериментов по обучению нейронных сетей использовался суперкомпьютер, предоставленный в рамках договора о сотрудничестве между ИМА НАН КР и КРСУ им. Б.Н. Ельцина. Основные характеристики используемого программного и аппаратного обеспечения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики используемого аппаратного обеспечения

Операционная система	Ubuntu 18.04.5 LTS
Материнская плата	ASUSTeK COMPUTER INC. TUF Z270 MARK 2
Процессор	Intel(R) Core(TM) i7-7700K CPU @ 4.20GHz
Твердотельный накопитель	ATA ADATA SP580
Память	32880 Мб
Графические адаптеры (GPU)	2 X NVIDIA Corporation GP104 [GeForce GTX 1080]
Суммарная производительность	17.7 TFLOPS

Как видно из таблицы 1, основную вычислительную мощность суперкомпьютера обеспечивают два GPU NVIDIA GeForce GTX 1080, имеющих 2560 ядер CUDA каждая, работающих на частоте 1607 MHz в режиме SLI, что позволяет задействовать одновременно оба графических адаптера.

В качестве основного программного обеспечения вычислительного эксперимента использовался контейнер на основе официального Docker-образа фреймворка машинного обучения TensorFlow версии tensorflow:2.4.1-gpu-jupyter.

Для достижения максимальной производительности использовалась «зеркальная» стратегия распределения работы, в равной мере разделяющая текущую задачу между всеми GPU и обеспечивающая синхронизацию с помощью алгоритма All-Reduce [5]. Это позволяет в среднем примерно на 70% задействовать вычислительную мощность обоих графических адаптеров (рис. 1).



```
RUN mkdir -p /home/sverzunov  
RUN chown -R sverzunov:sverzunov /home/sverzunov
```

Таким образом, описанная здесь программно-аппаратная конфигурация позволила в большей степени задействовать все имеющиеся в нашем распоряжении вычислительные ресурсы и достичь скорости обучения до 350 изображений в секунду при использовании, например, предварительно обученной сверточной нейронной сети EfficientNetB2, что на порядок больше того, что можно было бы достичь, если бы использовались только вычислительные мощности CPU.

### Исходные данные

В настоящей работе использовались четыре общедоступные базы данных рентгеновских снимков грудной клетки:

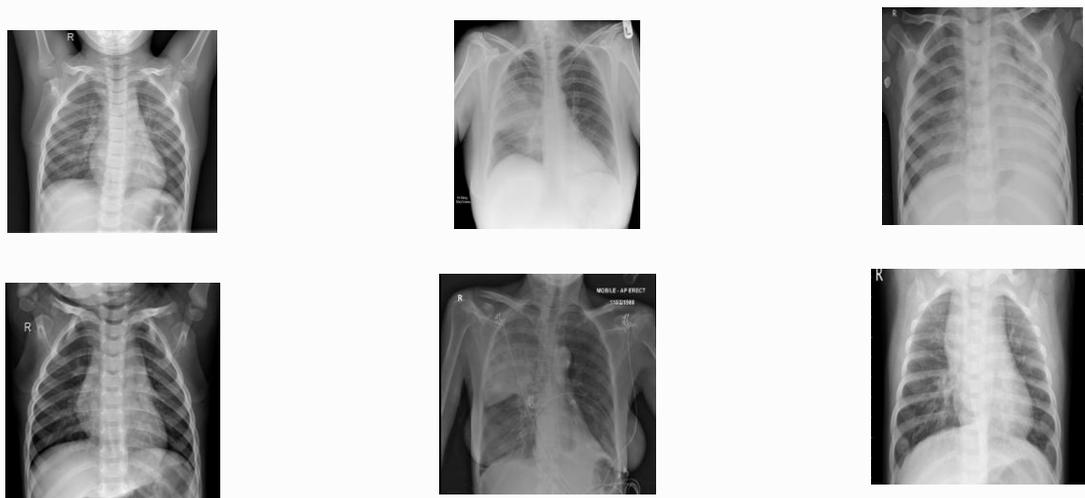
1. Chest X-Ray Images (Pneumonia) [6].
2. COVID-19 image data collection [7].
3. COVID-19\_Radiography\_Dataset [8].
4. TB\_Chest\_Radiography\_Database [9].

Набор данных [6] состоит из рентгеновских снимков грудной клетки здоровых людей и пациентов с бактериальной и вирусной пневмонией. Всего имеется 5856 рентгенограмм в передней прямой проекции, примерно 2/3 из них принадлежит пациентам, больным пневмонией, приблизительно поровну вирусной и бактериальной, а остальная часть здоровым пациентам.

Набор [7] содержит 468 рентгеновских снимков грудной клетки пациентов с COVID-19, 38 снимков с вирусной пневмонией, 46 снимков с бактериальной пневмонией, 26 снимков с грибковой пневмонией, 9 снимков с пневмонией другого типа и 59 изображений другого типа (рис. 2).

Набор [8] содержит 3616 рентгеновских снимков грудной клетки пациентов с COVID-19, 1345 снимков с вирусной пневмонией, 10192 снимка грудной клетки здоровых людей и 6012 снимков с затемнениями на легких, вызванными неизвестными причинами.

Набор [9] содержит 700 рентгеновских снимков пациентов с туберкулезом и 3500 снимков грудной клетки здоровых людей. Для классификации по двум классам из первого набора был выбран 191 рентгеновский снимок грудной клетки здоровых людей в передней прямой проекции (рис. 2а), а из второго набора 191 снимок грудной клетки пациентов, больных COVID-19 (рис. 2б), в передней и задней прямой проекции с дополнением данных путем случайного поворота на величину до 15° и случайного отражения в горизонтальной плоскости.



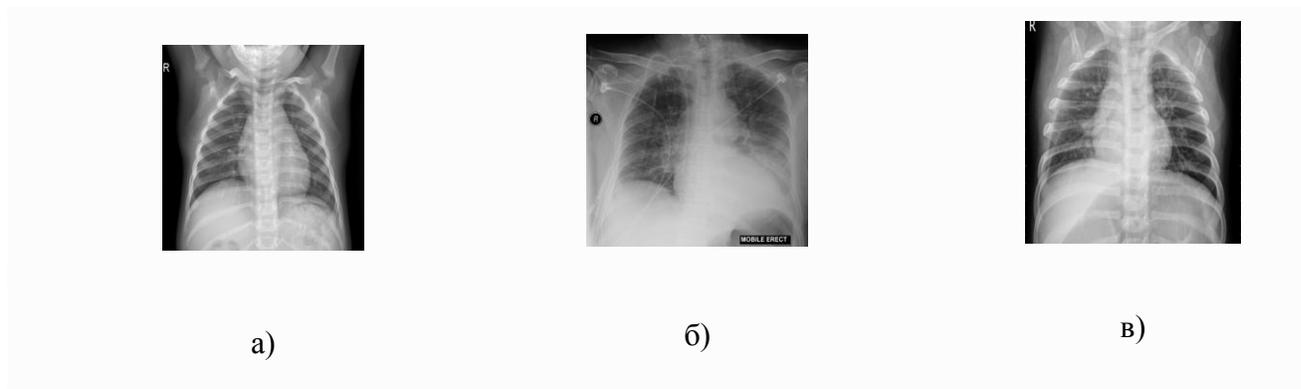


Рисунок 2 – Наборы данных:

а) Chest X-Ray Images (норма); б) COVID-19 image data collection (бактериальная пневмония); в) COVID-19\_Radiography\_Dataset (вирусная пневмония)

Дополнение отражением необходимо, так как в данных из первого набора присутствуют снимки только в передней проекции, во втором наборе как в передней, так и в задней проекции, а небольшой поворот изображения часто встречается при вводе изображения с помощью сканера или камеры.

Для классификации по 6 классам из всех вышеперечисленных наборов данных были выбраны 3616 рентгеновских снимков пациентов с COVID-19, 1345 снимков с вирусной пневмонией, 2780 снимков с бактериальной пневмонией, 6012 снимков с затемнением легких с невыясненной причиной, 700 снимков с туберкулезом и 10192 снимка грудной клетки здоровых людей, всего 27645 изображений (рис. 3).

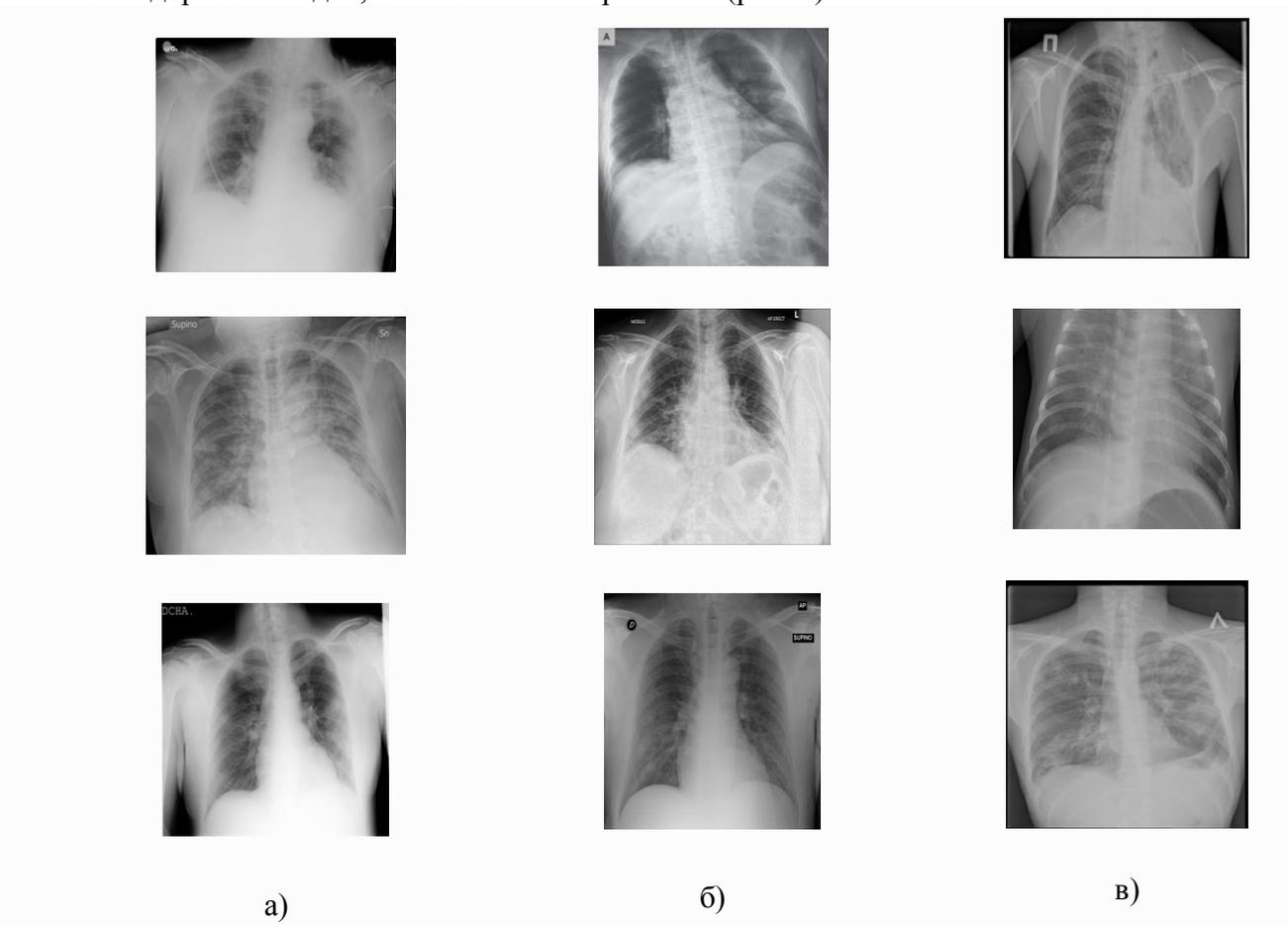


Рисунок 3 – Наборы данных: а) COVID-19\_Radiography\_Dataset (COVID-19); б) COVID-19\_Radiography\_Dataset (затемнение легких); в) TB\_Chest\_Radiography\_Database (туберкулез)

### Разработка архитектуры нейронной сети

В используемых здесь архитектурах предварительно обученных сверточных сетей последний слой с настраиваемыми весами по-прежнему является полносвязным слоем. Этот полносвязный слой, как и в работе [10], был заменен новой последовательностью слоев, состоящей теперь из слоя выбора среднего значения из соседних по всем каналам (слоя глобального пуллинга), для согласования размеров тензоров на выходе предыдущего слоя с входом последующего полносвязного слоя, состоящего из 128 нейронов, слоя прореживания с вероятностью 0,5 и выходного слоя из 6 нейронов, так как классификация производится по шести классам. Сравнение результатов приведено в таблице 2.

Сравнение убедительно свидетельствует о том, что обученные до достижения максимальной точности на протяжении 5 эпох нейронные сети на основе предварительно обученных CNN EfficientNetB3 и ResNet152 достигли наилучшего результата, чем 28 других моделей с точки зрения точности классификации и разных соотношений объема данных для обучения и проверки.

Таблица 2 – Результаты вычислительного эксперимента по диагностике различных видов пневмонии по рентгеновским снимкам грудной клетки

№	Модели	Точность, %	
		Обучающие данные 80%	Обучающие данные 50%
	DenseNet121	65	66
	DenseNet169	56	62
	DenseNet201	67	69
	EfficientNetB0	79	80
	EfficientNetB1	82	83
	EfficientNetB2	82	80
	EfficientNetB3	83	82
	EfficientNetB4	82	80
	EfficientNetB5	82	82
	EfficientNetB6	82	81
	EfficientNetB7	83	81
	InceptionResNetV2	41	41
	InceptionV3	41	41
	MobileNet	67	69
	MobileNetV2	68	67
	MobileNetV3Large	81	81
	MobileNetV3Small	80	77
	NASNetLarge	63	63
	NASNetMobile	60	60
	ResNet101	82	81
	ResNet101V2	41	41
	ResNet152	82	83
	ResNet152V2	41	41
	ResNet50	80	82
	ResNet50V2	41	41
	VGG16	82	79
	VGG19	82	78
	Xception	41	61

Так как предварительно обученная сверточная нейронная сеть EfficientNetB3 занимает меньший объем памяти, всего 48 МВ, по сравнению 232 МВ у ResNet152, для практического применения, в частности в мобильных приложениях, мы рекомендуем использовать именно эту сеть. Таким образом, архитектура сети имеет следующий вид, показанный в табл. 3.

Таблица 3 – Архитектура нейронной сети на основе CNN EfficientNetB3

Layer (type)	Output Shape	Param #
efficientnetb3 (Functional)	(None, 7, 7, 1536)	10783535
global_average_pooling2d_4 (	(None, 1536)	0
dense_8 (Dense)	(None, 128)	196736
dropout_4 (Dropout)	(None, 128)	0
dense_9 (Dense)	(None, 6)	774

Сверточная основа EfficientNetB3 имеет 10 783 535 параметров, что представляет собой достаточно большое число. Классификатор, добавленный сверху, имеет около 200 тысяч параметров. Поэтому перед обучением нейронной сети очень важно заморозить сверточную основу. Замораживание одного или нескольких слоев предотвращает изменение весовых коэффициентов в них в процессе обучения.

Если этого не сделать, тогда представления, прежде изученные сверточной основой, изменятся в процессе обучения на новых данных. Так как слои Dense сверху инициализируются случайными значениями, в сети могут произойти существенные изменения весов, фактически разрушив представления, полученные ранее.

На рисунке 4 показано изменение точности классификации на проверочном наборе данных в процессе обучения на протяжении 200 эпох. Как можно видеть из рисунка, обучая сеть на протяжении 97 эпох, можно достичь точности почти 87% на этапе проверки за счет тонкой настройки количества эпох обучения сети.

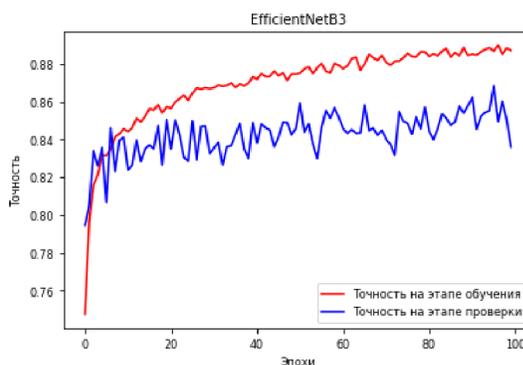


Рисунок 4 – Точность классификации на этапе обучения и проверки нейронной сети на основе предварительно обученной основы EfficientNetB3

Результаты, полученные по методу интегрированных градиентов и показанные на рисунке 5, дают представление об участках изображения, использующихся нейронной сетью для классификации изображений.

Для построения показанных на этом рисунке визуализаций интегрированного градиента использовались пиксели с уровнем значений использования сетью от 20 до 80% и нейронная сеть на базе сверточной основы EfficientNetB3.

Сеть сначала изучила внешние края и текстуру, а затем более абстрактные свойства изображений на высоких уровнях абстракции, что, на наш взгляд, привело к нахождению отличительных особенностей, эффективных для классификации рентгеновских снимков.

Для практической проверки разработанной части СИИ был подготовлен прототип мобильного приложения для операционной системы Android с помощью языка JAVA на базе фреймворка TensorFlow Lite, предоставляющего набор инструментов,

обеспечивающих реализацию машинного обучения на различных устройствах, позволяя использовать нейронные сети на мобильных, встроенных устройствах и устройствах Интернета вещей. Ключевыми особенностями этого фреймворка являются следующие:

1. Оптимизация для работы на мобильных и встроенных устройствах.
2. Поддержка нескольких платформ, включая устройства на базе Android и iOS, Linux и микроконтроллеров, например ESP32.
3. Поддержка разнообразных языков, включая Java, Swift, Objective-C, C++ и Python.
4. Высокая производительность за счет использования доступного аппаратного ускорения.
5. Подробная документация и большое количество примеров для часто встречающихся задач машинного обучения.

Разработанные выше нейронные сети были конвертированы в специальный переносимый формат, принятый в библиотеке TensorFlow Lite, так называемый FlatBuffers, и сохранены в файле с расширением tflite. Этот формат дает несколько преимуществ по сравнению с форматом, принятым в библиотеке Keras, таких, как уменьшенный размер (что важно в мобильных приложениях), и более быстрый доступ, который осуществляется напрямую, без дополнительного этапа синтаксического анализа и распаковки, что позволяет СИИ эффективно работать на переносных устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами и ресурсами памяти.

Полученные файлы в формате TensorFlow Lite дополнительно включают метаданные, содержащие описание нейронной сети, используемых ее классах и машиночитаемые данные для автоматического создания конвейеров предварительной и постобработки во время работы на устройстве.

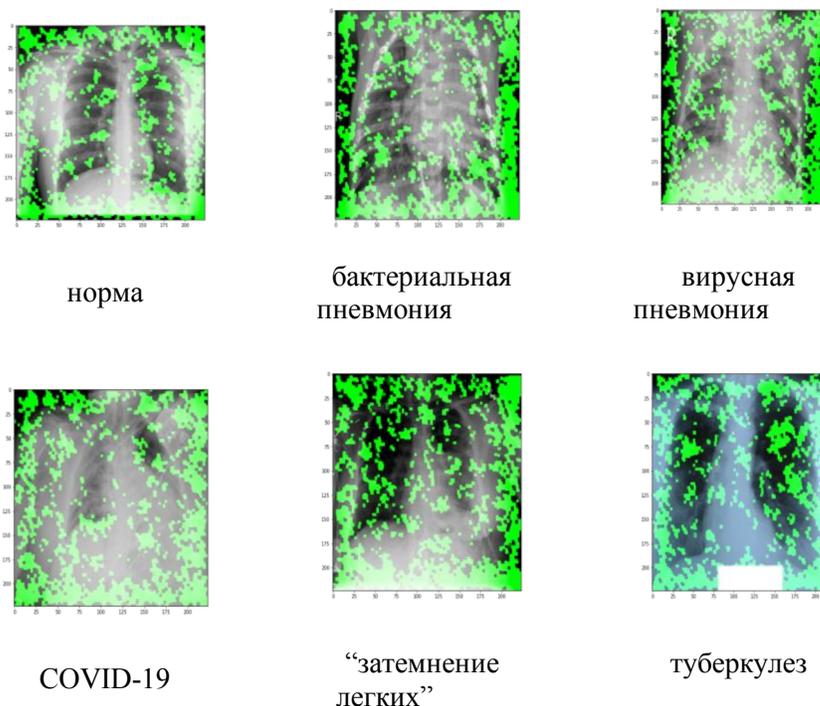


Рисунок 5 – Интерпретация результатов классификации различных изображений, показывающая, какие части изображения используются для классификации

Разработанный прототип мобильного приложения реализует такие функции, как (рис. 4):

1. Классификация изображения.
2. Отображение сведений о режиме работы нейронной сети.
3. Выбор количества потоков, используемых для работы нейронной сети.

4. Выбор используемой для классификации нейронной сети (DenseNet169 или EfficientNetB3).
5. Выбор используемого для работы нейронной сети устройства (CPU или GPU).

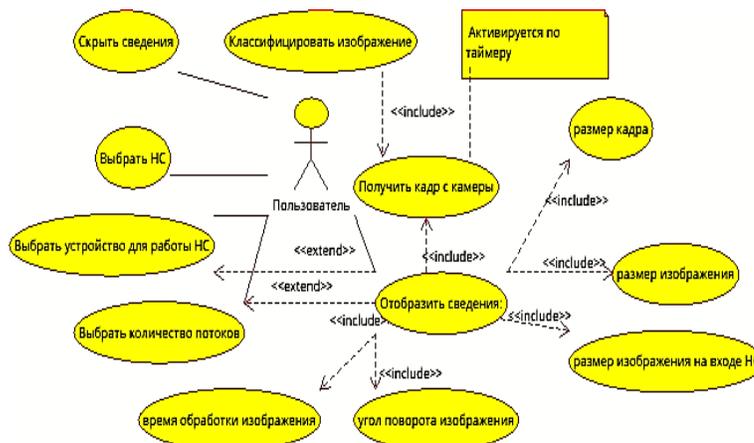


Рисунок 4 – Варианты использования прототипа программных средств

Через определенные промежутки времени, зависящие от времени обработки изображения, приложение получает “сырые” кадры с камеры. Нейронная сеть выполняет классификацию изображения по двум или шести классам в зависимости от выбранной модели сети. Пользователь может узнать распознанный сетью класс изображения, скрыть или отобразить дополнительные сведения о работе приложения, такие, как размер кадра; размер и угол поворота изображения, используемого сетью; время обработки изображения; количество используемых потоков процессора. Дополнительные сведения могут быть использованы для отладки программных средств (рис. 5).

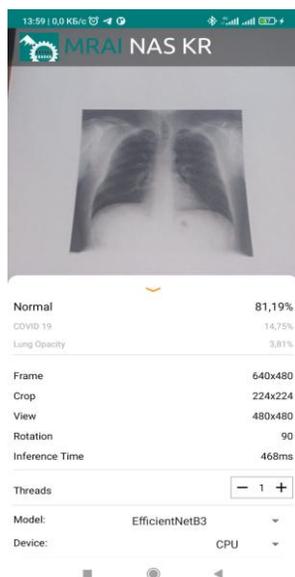
Кроме того, пользователь может выбрать используемую для классификации нейронную сеть для диагностики по двум или шести классам, количество потребляемых потоков процессора, а также прилагаемое нейронной сетью для работы устройство: CPU или GPU. В дальнейшем планируется дополнить разработанную программу базой данных изображений, присланных пользователями, что позволит улучшить точность работы СИИ.

### Выводы

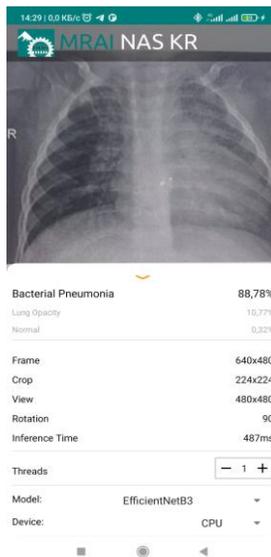
Таким образом, в результате исследований было подтверждено, что рентгеновские снимки грудной клетки могут иметь большое значение для постановки диагноза пациентам с COVID-19 и также могут быть полезны для диагностики различных видов пневмонии. Были собраны и проанализированы имеющиеся в сети Интернет рентгеновские снимки для диагностики COVID-19. Выполнен обзор и анализ литературы в области диагностики коронавирусной инфекции. Сформулированы критерии успешного решения задачи диагностики коронавирусной инфекции по рентгеновским снимкам в виде 6 характеристик для сравнения результатов обучения глубоких нейронных сетей.

Выполнена предварительная подготовка найденных изображений для построения нейросетевого классификатора на базе предварительно обученных сверточных нейронных сетей, выделены уникальные рентгеновские снимки грудной клетки по каждому классу: 10200, 1345, 2538, 3616, 700, 6012. В результате анализа изображений сформулирована задача диагностики коронавирусной инфекции как задача бинарной (COVID-19, норма) и многоклассовой классификации изображений грудной клетки по 6 классам: норма, вирусная пневмония, бактериальная пневмония, COVID-19, туберкулез, неуточненное заболевание легких. Разработаны и протестированы архитектуры на базе предварительно обученных сверточных нейронных сетей для дифференциальной диагностики коронавирусной инфекции и различных видов пневмонии. Выполнена регуляризация и настройка гиперпараметров предлагаемой нейронной сети: параметров прореживания, количества слоев, числа нейронов на слой, шага обучения оптимизатора. В результате

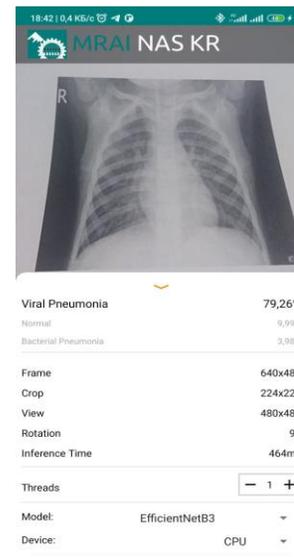
найлены наиболее оптимальные настройки нейронной сети. Разработан прототип мобильного приложения для диагностики различных видов пневмонии, который используется для тестирования и усовершенствования разработанной СИИ.



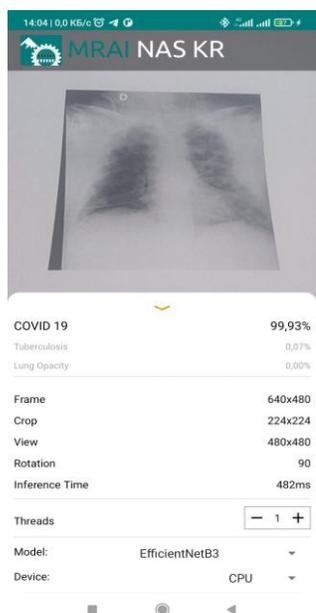
*норма*



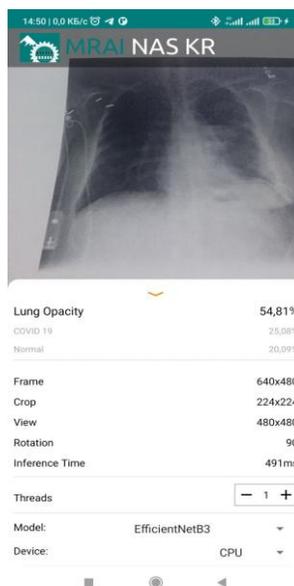
*бактериальная  
пневмония*



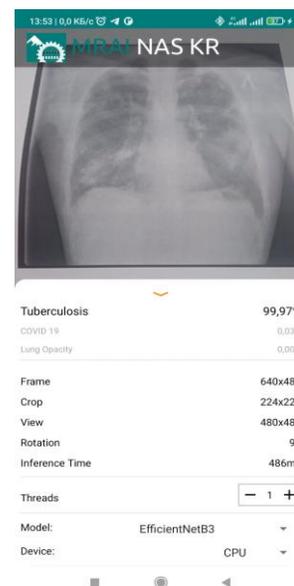
*вирусная пневмония*



*COVID-19*



*“затемнение легких”*



*туберкулез*

Рисунок 5 – Интерфейс и примеры диагностики различных заболеваний с помощью разработанного прототипа программных средств

### **Литература**

1. Яковлев, В. О. Анализ современного состояния исследований в области распознавания снимков функциональной диагностики легких / В. О. Яковлев // Мавлютовские чтения: Материалы XV Всероссийской молодежной научной конференции: в 7 томах, Уфа, 26–28 октября 2021

- года. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2021. – С. 290–301.
2. Макаров В.В., Блатова Т.А., Ворошилова Е.Ю. Ускоренное развитие информационных технологий в период пандемии // Экономика и качество систем связи. 2021. №2 (20). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uskorennoe-razvitiye-informatsionnyh-tehnologiy-v-period-pandemii> (дата обращения: 18.07.2021).
  3. Васильченко Владислав Алексеевич, Бурковский Виктор Леонидович, Данилов Александр Дмитриевич Алгоритмизация процесса распознавания состояний физиологических объектов на основе специальных рентгеновских изображений КО.–2019.–№2.–URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritmizatsiya-protssessa-raspoznavaniya-sostoyaniy-fiziologicheskikh-obektov-na-osnove-spetsialnyh-rentgenovskih-izobrazheniy> (дата обращения: 18.07.2021).
  4. Хаджибаев Абдухаким Муминович, Адылова Фатима Туйчиевна, Касимов Хамит Махмудович, Шарипова Висолат Хамзаевна, Исхаков Нурбек Баркамолович. Роль искусственного интеллекта в прогнозировании проблем COVID-19: аналитический обзор // Вестник экстренной медицины. –2020. – №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-iskusstvennogo-intellekta-v-prognozirovanii-problem-covid-19-analiticheskiy-obzor> (дата о обращения: 18.07.2021).
  5. [https://www.tensorflow.org/api\\_docs/python/tf/distribute/MirroredStrategy](https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/distribute/MirroredStrategy) (дата обращения: 18.07.2021)
  6. Daniel S. Kermany et al, Identifying Medical Diagnoses and Treatable Diseases by Image-Based Deep Learning, Cell, Volume 172, Issue 5, 2018, Pages 1122-1131.e9, ISSN 0092-8674, <https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.02.010>.
  7. COVID-19 Image Data Collection: Prospective Predictions Are the Future Joseph Paul Cohen and Paul Morrison and Lan Dao and Karsten Roth and Tim Q Duong and Marzyeh Ghassemi arXiv:2006.11988, <https://github.com/ieee8023/covid-chestxray-dataset>, 2020
  8. Rahman, T., Khandakar, A., Qiblawey, Y., Tahir, A., Kiranyaz, S., Kashem, S.B.A., Islam, M.T., Maadeed, S.A., Zughair, S.M., Khan, M.S. and Chowdhury, M.E., 2020. Exploring the Effect of Image Enhancement Techniques on COVID-19 Detection using Chest X-ray Images
  9. Tawsifur Rahman, Amith Khandakar, Muhammad A. Kadir, Khandaker R. Islam, Khandaker F. Islam, Zaid B. Mahub, Mohamed Arselene Ayari, Muhammad E. H. Chowdhury. (2020) "Reliable Tuberculosis Detection using Chest X-ray with Deep Learning, Segmentation and Visualization". IEEE Access, Vol. 8, pp 191586 - 191601. DOI. 10.1109/ACCESS.2020.3031384
  10. Верзунов, С. Н. Сравнение глубоких нейронных сетей на основе различных предварительно обученных CNN для диагностики COVID-19 по рентгеновским снимкам / С. Н. Верзунов, Х. А. Раимжанов // Проблемы автоматизации и управления. – 2021. – № 1(40). – С. 12–25.

УДК 004.8: 621.315.23

**Бакасова А. Б.<sup>1</sup>, [bakasovaaina@mail.ru](mailto:bakasovaaina@mail.ru)  
Асан уулу Аскат<sup>2</sup>, [asanaskat@gmail.com](mailto:asanaskat@gmail.com)**

<sup>1</sup>Институт машиноведения и автоматизации (ИМА) Национальной академии наук Кыргызской Республики. Кыргызстан, Бишкек, проспект Чуй, 265

<sup>2</sup>Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Кыргызстан, Бишкек, проспект Ч. Айтматова, 66

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

Рассматриваются проблемы возникновения электромагнитных помех между высоковольтными линиями электропередачи и подземными металлическими трубопроводами. Для оценки потенциала вектора магнитного поля для различных конструктивных геометрий конкретной конфигурации задачи применен метод искусственного интеллекта на основе нейронных сетей. С целью нахождения оптимальных решений протестированы разные архитектуры нейронных сетей. Результаты, полученные с помощью нейронных сетей, сравнены со стандартными решениями таких задач методом конечных элементов.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, электромагнитная обстановка, электромагнитные помехи, нейронные сети.

### Введение

Для снижения затрат на строительство и из-за правительственных постановлений [9], ограничивающих доступ к новым полосам отчуждения, коммунальные предприятия (газ, вода или нефть) вынуждены делить на большие расстояния одни и те же распределительные коридоры с линиями электропередачи высокого напряжения (ЛЭП ВН) или железнодорожными системами переменного тока.

С учетом этой полосы отвода подземные металлические трубопроводы (МТ) для подачи газа, воды или нефти подвергаются воздействию наведенного переменного тока и напряжения. В случае одно- или двухфазных КЗ на высоковольтной линии переменного тока индуцированное напряжение переменного тока в несимметричных МТ может достигать тысяч вольт. Это может быть очень опасно как для рабочего персонала, так и для структурной целостности трубопровода из-за коррозионного воздействия [1].

Решение проблем, связанных с электромагнитными полями и помехами, а также заземлением электроэнергетических систем, является актуальной задачей, так как между ними существует множество взаимосвязей (могут возникать кондуктивные электромагнитные помехи). Практически любая попытка смоделировать проблемы, связанные с током, циркулирующим вне фазных проводов, или индуцированными токами за счет индукционных эффектов (в почве, нейтральных проводах заземления, металлических трубопроводах), должна учитывать многие аспекты, касающиеся электромагнитных помех и электромагнитных полей. Для моделирования описывающих эти сложные проблемы конфигурации систем, известны использование конкретных численных методов, таких как метод конечных элементов (МКЭ), который преобразует систему дифференциальных уравнений электромагнитных помех в численную [2].

Решения, полученные МКЭ, очень точны в отношении сложности проблемы, но время вычисления этого метода увеличивается линейно с увеличением геометрии задачи, ее сетки, характеристик материала и требуемых параметров оценки. Изучение электромагнитных помех между ЛЭП ВН и МТ с помощью МКЭ для различных конфигураций системы требует дорогостоящего вычислительного времени, потому что для каждой новой рассматриваемой геометрии задачи МКЭ включает новую сетку и новые вычисления. Следовательно, метод масштабирования результатов от одного случая конфигурации к другому может представлять интерес, если он обеспечивает меньшее время вычислений. Таким образом целью работы является сокращение времени

вычислений, необходимого для изучения новой геометрии задачи, в данной работе предлагается метод на основе искусственного интеллекта – применение нейронной сети (НС).

### Постановка задачи

Оценка вектора магнитного потенциала (ВМП), наведенного на МТ, для задачи электромагнитных помех. Проблема, представленная на рисунке 1, относится к подземному металлическому газопроводу, который разделяет на 25 км тот же распределительный коридор с ЛЭП 110 кВ на частоте 50 Гц. [4, 5]

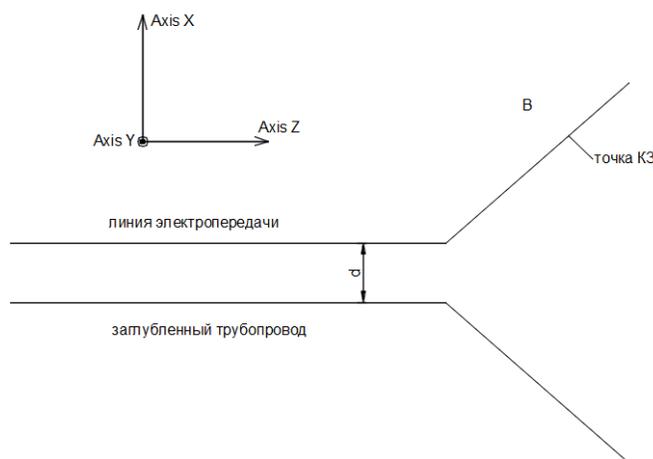


Рисунок 1 – Вид сверху исследуемой конфигурации

Предполагается, что замыкание фазы на землю происходит в точке В, далеко за пределами общего распределительного коридора ЛЭП-МТ. Ток заземления, связанный с этим повреждением, оказывает незначительное воздействие на подземный трубопровод. Этот факт позволяет предположить только индуктивные помехи, вызванные протекающим током короткого замыкания на участке, где ЛЭП ВН проходит параллельно заглубленному газопроводу.

ЛЭП ВН состоит из двух армированных сталью алюминиевых проводов на каждую фазу. Провода АС имеют радиус 120/19 мм, у газопровода внутренний радиус 0,195 м, внешний радиус – 0,2 м и радиус покрытия – 0,1 м. Характеристики материалов в этой конфигурации: грунт однородный; проволоки МТ и АС имеют проводимость  $\sigma = 7 \cdot 10^5 \text{ См/м}$ , относительная проницаемость  $\mu_r = 250$  [4].

Конечные эффекты не учитываются, что приводит к двумерной (2D) проблеме, которая зависит от расстояния  $d$  между ЛЭП и МТ, от удельного сопротивления грунта  $\rho$ , от координат  $x$  и  $y$  точки, в которой желательно иметь определенный вектор магнитного потенциала. На рисунке 2 показано сечение исследуемой конфигурации:

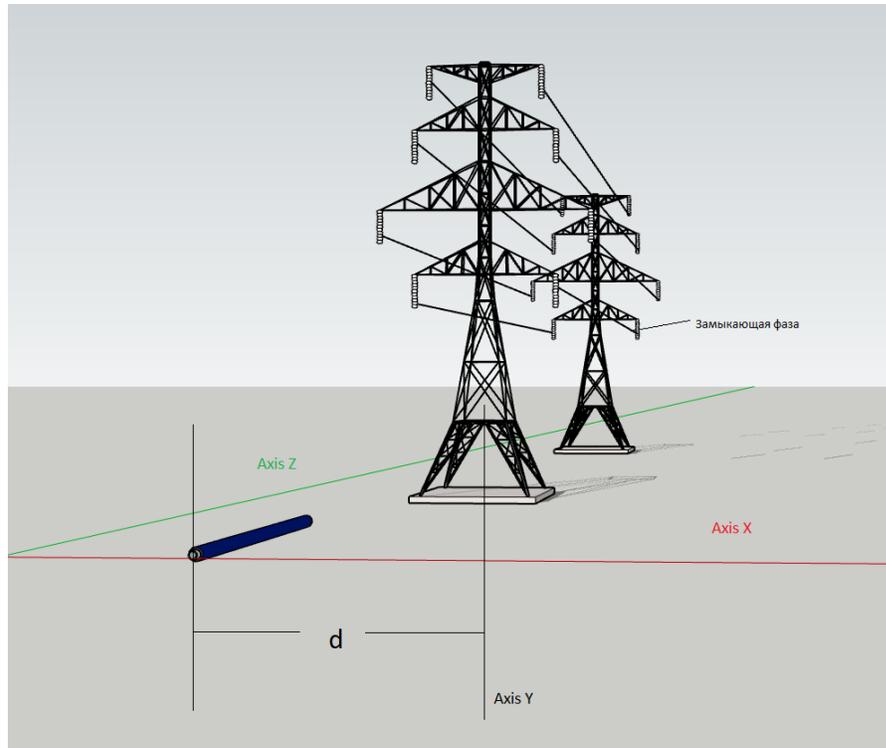


Рисунок 2 – Поперечный разрез исследуемой системы

Таким образом, с учетом сечения исследуемой системы компонента направления  $z$  векторного магнитного потенциала  $A_z$  и полной плотности тока  $J_z$  описывается следующей системой уравнений [5]:

$$\begin{cases} \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \left[ \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} \right] - j\omega\sigma A_z + J_{sz} = 0 \\ -j\omega\sigma A_z + J_{sz} = J_z \\ \iint_{S_i} J_z ds = I_i \end{cases} \quad (1)$$

где  $\sigma$  – проводимость,  $\omega$  – угловая частота,  $\mu_0$  – магнитная постоянная ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м),  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость окружающей среды,  $J_{sz}$  – плотность тока источника в направлении  $z$ , а  $I_i$  – ток, приложенный к проводнику  $i$  с поперечным сечением  $S_i$ .

Решение системы (1) для заданной геометрии задачи (разделительное расстояние ЛЭП-МТ, удельное сопротивление грунта) с помощью МКЭ занимает от 20 до 50 минут в зависимости от дискретности сетки. Это время вычислений необходимо повторить для каждой геометрии задачи, которую хотим исследовать и применить вычисление с помощью нейронных сетей.

С целью сокращения времени вычислений, необходимого для оценки значений ВМП для каждой геометрии задачи, в работе реализовано решение нейронной сети для масштабирования значений ВМП для набора известной геометрии задачи.

### Структура нейронной сети

Нейронные сети (НС) относятся к группе методов искусственного интеллекта (ИИ) для анализа данных, которые не похожи на другие классические методы анализа.

ИИ узнает о выбранном предмете из предоставленных ему данных, а не определяется пользователем. НС получают свои знания, обнаруживая отношения между входными и выходными данными [6].

Искусственный нейрон (рис. 1) представляет собой систему, которая имеет переменное количество входов  $x_n$ ,  $n = 1, m$  (дендриты) и только один выход  $y$  (аксон). Входные данные искусственных нейронов умножаются на некоторые параметры  $w_n$ , называемые весами, и добавляются друг к другу. Взвешенная сумма входов добавляется к параметру  $b$ , называемому смещением [7].

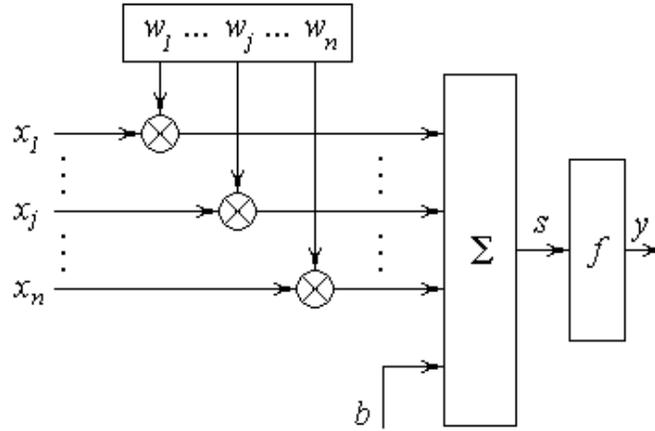


Рисунок 3 – Строение искусственного нейрона

Затем последняя сумма, обозначенная  $s$ , используется в качестве аргумента функции, которая производит выходной сигнал искусственных нейронов. Эта функция называется передаточной функцией и может принимать различные формы, специфичные для каждого нейрона. Это эквивалент ядра биологического нейрона. Таким образом, выход искусственных нейронов описывается следующим соотношением [7]:

$$y = f_a(s), \quad \text{где } s = \sum_{n=1}^m (x_n \cdot w_n) + b \quad (2)$$

Группа искусственных нейронов, которые работают параллельно, их входы и выходы имеют одно и то же назначение из слоя. Каждая нейронная сеть должна содержать по крайней мере один слой нейронов, но может присоединяться к любому количеству нейронов. Слой, где собраны нейроны, которые передают выходные данные нейронной сети, называется выходным слоем.

Слои, которые содержат нейроны, расположенные между глобальными входами нейронной сети и входами нейронов из выходного слоя, называются скрытыми слоями [8]. Обычно используются НС с прямой связью, которые содержат скрытый слой и выходной слой. На рисунке 4 представлена упрощенная блок-схема двухуровневой нейронной сети с прямой связью.

Окончательные результаты нейронной сети с прямой связью будут следующими [4]:

$$v_j = f_{a1}(s_j^1) = f_{a1} \left( \sum x_n \cdot w_{nj} + b_j^1 \right), \quad (3)$$

$$y_i = f_{a2}(h_i^2) = f_{a2} \left( \sum_j (w_{kj} \cdot f_{a1}(h_j^1)) + b_j^2 \right). \quad (4)$$

Обучение нейронной сети – это процесс, в котором ее учат обеспечивать желаемые выходные значения.

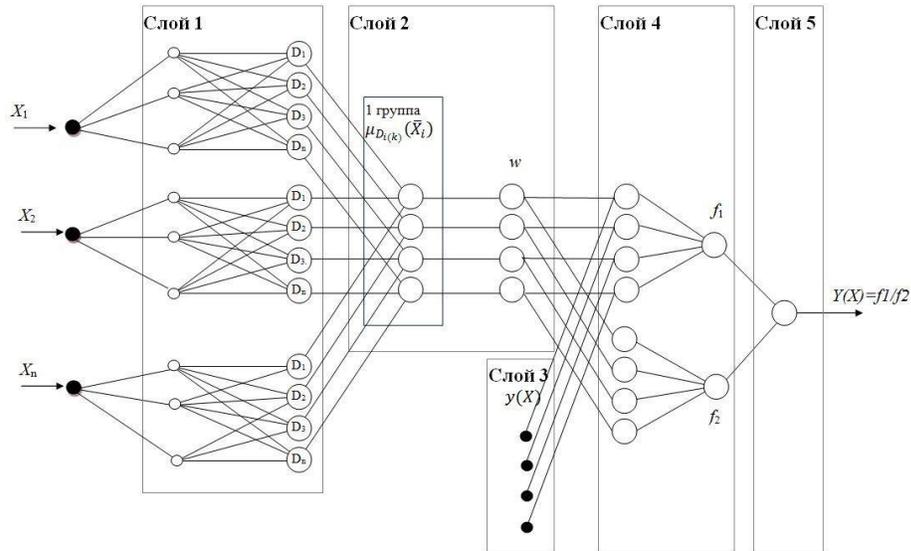


Рисунок 4 – Нейронная сеть с прямой связью

Согласно рисунку 5, веса НС корректируются в зависимости от ошибки между фактическими выходами НС и желаемыми. Эта ошибка оценивается функцией производительности.

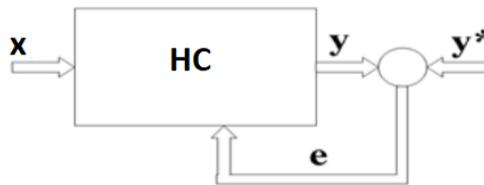


Рисунок 5 – Нейронная сеть с прямой связью

Среднеквадратичная ошибка используется как функция производительности:

$$E = \frac{1}{n} \cdot \left( \sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2 \right) \quad (5)$$

### Решение

Для точного определения вектора магнитного потенциала в каждой точке исследуемой области необходимо оценить амплитуду и фазу ВМП. Для получения более точных результатов, учитывая различный диапазон их изменения до значений:  $10^{-6} \div 10^{-4}$  [Вт / м] для амплитуды и соответственно  $-180^\circ \div 180^\circ$  для фазы, реализовано две разные нейронные сети – одна для амплитуды, другая для фазы – в место реализации единой НС, которая обеспечивает как амплитуду, так и фазу. Так как в некоторых задачах нужно найти только фазу или амплитуду. Для этого были применены две отдельные разные нейронные сети для удобства вычисления. Эти две НС имеют в качестве входных значений параметры, которые описывают представленную двумерную задачу:

- d - безопасное расстояние между ВЛ и МТ (от 10 м до 2000 м);
- ρ - удельное сопротивление грунта (от 30 Ом · м до 1000 Ом · м);
- x, y - координаты точки, в которой будет оцениваться ВМП.

Для реализации предложенных двух НС использовался инструментарий Neural Networks из программы MatLab. Это программное обеспечение позволяет создавать практически все типы сетей, от перцептронов (однослойные сети, используемые для классификации) до более сложных архитектур с прямой связью или рекуррентных сетей. Для создания нейронной сети с прямой связью в среде MatLab необходимо использовать следующую функцию [4]:

$$net = newff P,T,S,TF,BTF,BLF,PF, (6)$$

где

- $P$  – матрица  $R \times Q1$  репрезентативных входных векторов  $R$ -элементов  $Q1$ ;
- $T$  – матрица  $SN \times Q2$  репрезентативных целевых векторов элементов  $SN$  для  $Q2$ .
- $S$  – вектор, представляющий количество нейронов в каждом скрытом слое;
- $TF$  – вектор, представляющий передаточную функцию, используемую для каждого слоя;
- $BTF$  – функция обратного распространения, используемая для обучения НС;
- $BLF$  – функция обучения весу / смещению;
- $PF$  – функция оценки эффективности.

С целью нахождения оптимальных решений для оценки амплитуды и фазы ВМП были реализованы различные архитектуры НС. Выбрана базовая архитектура НС с прямой связью с одним скрытым слоем и одним выходным слоем. Количество нейронов в скрытом слое варьировалось от 5 до 30 с шагом 5 нейронов. Передаточная функция выходного слоя была установлена на *purelin* (линейная передаточная функция), а передаточная функция на скрытом слое варьировалась между *tansig* (сигмоидальная передаточная функция гиперболического тангенса), *logsig* (логарифмическая сигмоидальная передаточная функция и *purelin*). Также производительность функции оценки варьировалась между *mse* (среднеквадратичная ошибка), *msereg* (среднеквадратичная ошибка с характеристиками регуляризации) и *sse* (ошибка в квадрате суммы).

Для обучения различных архитектур нейронных сетей был реализован метод обучения Левенберга-Марквардта и метод обучения нисходящего градиента с использованием правила обучения с моментом веса. В качестве обучающей базы данных использовался набор значений ВМП, оцененных с помощью МКЭ и представленных в [4]. Эти значения ВМП были рассчитаны в разных точках до 15 различных геометрических фигур (удельное сопротивление грунта / разделительное расстояние), получение набора из 37 пар ввода / вывода, используемых для обучения предлагаемой НС. В таблице 1 представлены данные обучения.

Таблица 1. Пары ввода / вывода (амплитуда), используемые для обучения предлагаемой НС

№	d, [м]	x, [м]	y, [м]	ρ [Омм]	ВМП	
					Амплитуда $10^{-3}$ [Вб/м]	Фаза [°]
1	70	70	-15	30	36.1	-22.8
5	800	818.25	-13.5	30	3.88	-82.61
9	400	384.81	-7.82	70	17.2	-44.46
14	70	40	0	100	55.9	-18.53
18	1000	1022.5	0	100	7.23	-67.27
23	300	290.26	-15.8	500	35.5	-26.74
28	700	670	-22.5	700	26	-33.74
30	150	150.55	-16.99	900	53	-19.7
33	1500	1499.1	-17.48	900	15.6	-46.35
37	2000	2030	-5	1000	12.2	-52.73

Чтобы получить более высокую точность результатов, выдаваемых двумя нейронными сетями, обучающая база данных, представленная в [4], дополняется двадцатикратным копированием, при этом добавляется аддитивная случайная составляющая, которая моделирует погрешности, возникающие в процессе измерения. Выбрано следующая обучающая выборка:

$$Y = \left[ (x^{(i)}, v^{(i)}), x^{(i)} \in X, v^{(i)} \in V, i = 1, \dots, n \right], (6')$$

где  $x^{(i)} \in X \subset R^m$  – векторы  $m$ -мерного пространства – набор информативных признаков. Процесс обучения как амплитудной, так и фазовой нейронных сетей занимал от 10 секунд до 1 минуты, в зависимости от архитектуры нейронной сети.

После обучения НС они могут автоматически предоставлять амплитуду, соответственно фазу ВМП для любой комбинации входных данных. Чтобы получить выходное значение, заданное реализованной НС, использовалась следующая функция MatLab:

$$sim(NET, X, T) \tag{7}$$

где  $NET$  – реализованная нейронная сеть;  $X$  – матрица размера  $R \times QI$  матрицы  $QI$  репрезентативные входные векторы  $R$  – элемента;  $T$  – это матрица размера  $SN \times QI$  матрицы  $QI$ , репрезентативные целевые векторы  $SN$ -элемента.

Чтобы определить оптимальную архитектуру НС как для амплитуды, так и для фазы и увидеть, как они реагируют на присутствие совершенно новой геометрии проблем, реализованная НС была протестирована, предоставив в качестве входных значений базу данных, представленную в таблице 2. Полученные результаты сравнивались со значениями ВМП, полученными с помощью расчета МКЭ [4].

Таблица 2– Пары ввода / вывода (фаза), используемые для обучения предлагаемой НС

№	d, [м]	x, [м]	y, [м]	ρ [Омм]	ВМП	
					Амплитуда $10^{-3}$ [Вб/м]	Фаза [°]
1	70	40	-15	100	53,8	-19,34
2	70	81,66	-27,03	30	32,90	-25,57
3	400	392,25	-25,56	70	16,7	-46,05
4	300	281,66	-27,03	500	37,5	-25,93
5	700	590,36	-15,80	700	25,6	-34,07
6	1000	1007,50	0	70	5,68	-72,98
7	1000	1015	-30	100	7,16	-69,22
8	1500	1524,77	-6,93	900	15,40	-46,56

После анализа максимальной и средней процентной ошибки между полученными результатами в качестве выходных значений реализованных сетей и результатами, полученными с расчетом МКЭ для наборов данных тестирования и обучения, выбраны оптимальные архитектуры НС.

В случае НС, который вычисляет амплитуду, оптимальная архитектура НС - НС с прямой связью с 10 нейронами и передаточной функцией *tansig* на скрытом слое, соответственно, функция среднеквадратичной ошибки *sse*, используемая для оценки производительности. Эта оптимальная архитектура НС регистрирует максимальную ошибку 1,72% и среднюю ошибку 0,71% для набора данных тестирования. Для всех остальных протестированных архитектур НС средние процентные ошибки больше 2%. На рисунке 6 представлено абсолютное отклонение между результатами, полученными с оптимальной архитектурой НС, и результатами, рассчитанными с помощью МКЭ для набора данных тестирования.

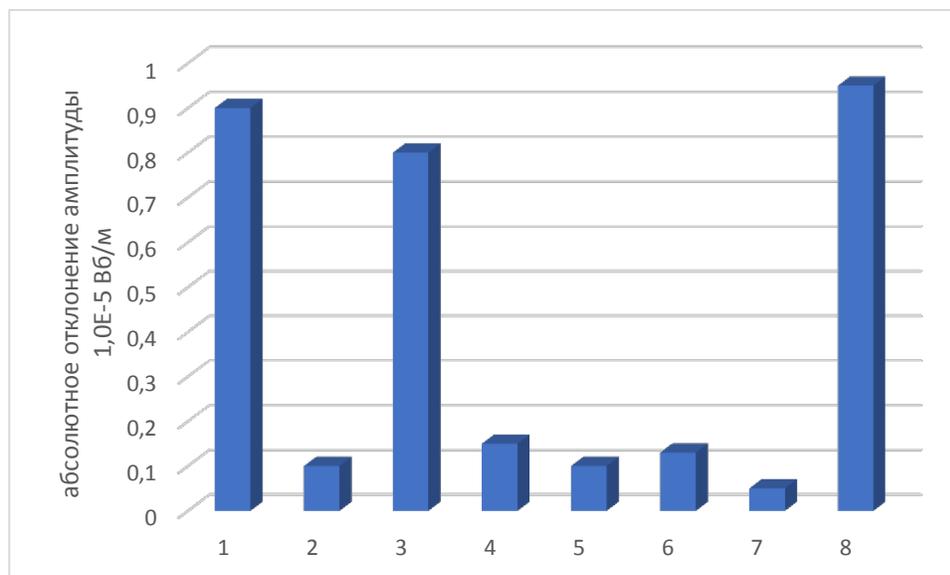


Рисунок 6 – Абсолютное отклонение для оптимальной амплитуды НС

В случае НС, который вычисляет фазу, оптимальной архитектурой была НС с прямой связью с 5 нейронами и передаточной функцией *logsig* на скрытом слое, соответственно функция суммы квадратов ошибок *mse*, используемая для оценки производительности [10]. Эта оптимальная архитектура НС представляет максимальную ошибку 5,47% и среднюю ошибку 1,54% для набора данных тестирования; для всех остальных протестированных архитектур НС максимальная погрешность в процентах больше 10%. На рисунке 7 представлено абсолютное отклонение между результатами, полученными с оптимальной архитектурой НС, и результатами, рассчитанными с помощью МКЭ для тестирования.

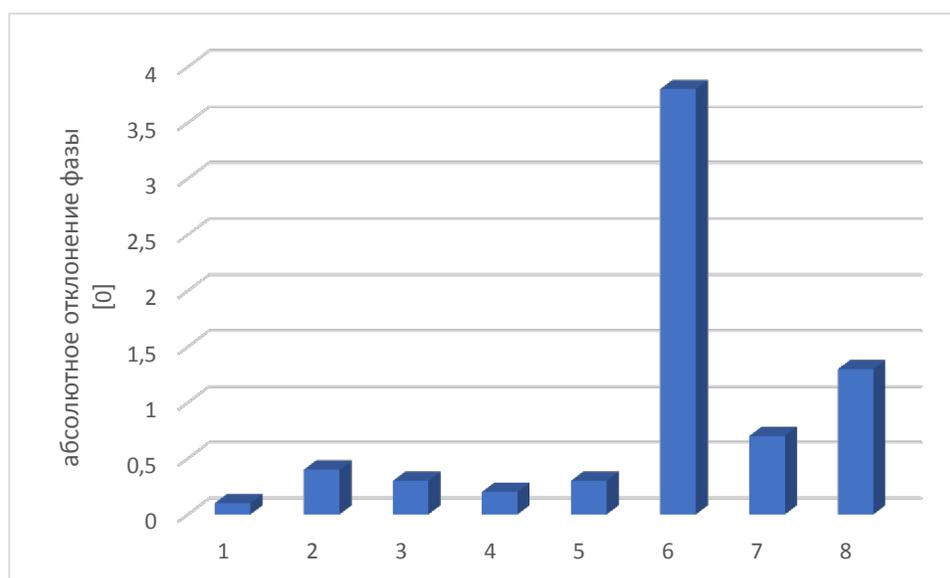


Рисунок 7 – Абсолютное отклонение для оптимальной фазы НС

### Заключение

Для определения оптимального решения нейронной сети были реализованы и протестированы различные архитектуры. Полученные результаты сравнены с методами МКЭ, считающимися стандартными.

Предложено использовать технику искусственного интеллекта для масштабирования значений ВМП для любой геометрической конфигурации для конкретной проблемы электромагнитных помех из набора известных геометрий проблемы, чтобы сократить время вычислений для новых конфигураций задач. Из рисунков 6 и 7 можно заметить, что

абсолютные отклонения решений, обеспечиваемых идентифицированными оптимальными архитектурами НС, почти незначительны как для амплитуды, так и для фазы НС по сравнению с решениями, предоставляемыми МКЭ.

Метод с использованием нейронных сетей, реализованный для оценки ВМП для различных геометрических конфигураций, является эффективным, особенностью которого является то, что решения, предоставляемые нейронными сетями, получаются мгновенными по сравнению с МКЭ.

### ***Литература***

1. Давалиби Ф. Анализ электрических помех от линий электропередачи к газопроводам. Часть I. Методы вычислений, IEEE Trans. on Power Delivery, 4, 3, pp. 1840–1848 (1989).
2. Дэн Д. Мику, И. Лингвей, К. Лингвей, Л. Дарабант, А. Чеклан, Численная оценка наведенных напряжений в металлических подземных трубопроводах, Rev. Roum. des Sci. Техн. - Электротехн. et Énerg., ISI Journal, 54, 2. – С. 175–184 (2009).
3. Руководство по влиянию высоковольтных систем переменного тока на металлические трубопроводы, Рабочая группа 36.02 СИГРЭ, Канада, 1995.
4. К. Дж. Сациос, Д. П. Лабридис, П. С. Докопулос. Система искусственного интеллекта для сложной задачи электромагнитного поля: Часть I . Расчет методом конечных элементов и разработка нечеткой логики, IEEE Trans. on Magnetics, 35, 1. – С. 516–522, 1999.
5. K. J. Satsios, D. P. Labridis, P. S. Dokopoulos, An Artificial Intelligence System for a Complex Electromagnetic Field Problem: Part II – Method Implementation and Performance Analysis, IEEE Trans., 35, 1, pp. 523-527 (1999).
6. S. Al-Badi, K. Ellithy, S. Al-Alawi, Prediction of Voltages on Mitigated Pipelines Paralleling Electric Transmission Lines Using an Artificial Neural Network, The Journal of Corrosion Science and Engineering, 10 (2007).
7. M. Caudil, C. Butler, Understanding Neural Networks: Computer Exploration, Vol. 1 & Vol. 2, MA: MIT Press, Cambridge, 1992.
8. H. Demuth, M. Beale, Neural Networks Toolbox. Users' Guide, Ver. 3. The MATHWORKS Inc., 1998.
9. Строительные нормы и правила, ч. 1, гл. 1 // Система нормативных документов -СНиП 2.11.03-93
10. Верзунов С. Н. Система искусственного интеллекта для онлайн -мониторинга подземных силовых кабельных линий на основе технологий глубокого обучения// Проблемы автоматизации и управления. – №3.– (2021). – С. 83–94.

УДК 004.057.2

***В. Гайдамако, dolpha@gmail.com***

*Институт машиноведения и автоматизации НАН КР*

## **РЕФЕРЕНСНАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ И СРЕДЫ ВЕБ-СЕРВИСОВ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТОВ OGC**

Существующее многообразие сенсорных устройств требует стандартизации описания как самих устройств, так и измерительной информации, приемов ее обработки, стандартов отображения и сопряжения датчиков во Всемирной паутине. Open Geospatial Consortium разработал не только стандарты описания датчиков и данных измерений, но и стандарты веб-сервисов. В статье описываются стандарты OGC, касающиеся работы с датчиками, а также архитектура эталонной модели веб-сервиса для доступа к ресурсу.

**Ключевые слова:** OGC, KML, GML, SensorML, веб-сервис, OGC Web Services (OWS), Sensor Web Enablement (SWE)

### **Введение**

Основой современных распределенных информационно-измерительных систем являются «умные» датчики, которые имеют собственную память, микропроцессор и могут подсоединяться к сети Интернет. Среда распределенных измерений должна обеспечить доступ не только к данным измерений, но и к самому датчику для получения данных в реальном времени и в некоторых случаях для настройки и управления. Так как датчики, получаемые измерения, запросы пользователей, приложения могут быть самыми разными, возникает потребность в стандартизации работы с датчиками и сенсорной информацией.

Существует множество стандартов для описания датчиков и управления ими, стандартов сенсорной информации и описания процессов ее обработки. Стандарты позволяют создавать программное обеспечение, способствующее собирать и обрабатывать данные с разнообразных датчиков на различных платформах. Модели данных могут использоваться для создания шаблонов сенсорной информации и сохранения ее в базах данных. Таким образом, стандарты являются отправной точкой для создания модели данных физических и виртуальных датчиков в системах распределенных измерений, в облачных ИИС, в Интернете вещей и других системах, компонентами которых являются датчики и актуаторы (в зарубежных документах их объединяют термином «трансдюсер» –transducer, преобразователь).

Разработкой стандартов в области работы с датчиками и представления сенсорной информации в настоящее время занимается Open Geospatial Consortium (OGS) [1], организация, которая была создана в 1994 году для стандартизации геопространственной информации. К настоящему времени OGC имеет огромный опыт и авторитет в области обработки стандартов, в консорциум входит более 500 организаций, поэтому неудивительно, что именно OGC стала основной организацией, создающей стандарты доступа и представления геопространственной и другой информации через Всемирную паутину (Web), в том числе измерительной информации, так как местоположение любого датчика или известно заранее, или фиксируется в момент измерения. Созданы стандарты доступа к информации через веб-сервисы OGC Web Services (OWS), стандарты работы с датчиками через Всемирную паутину – Sensor Web Enablement (SWE). OGC поддерживает тесную связь с Техническим комитетом Международной организации по стандартизации ISO/TC211[2], который специализируется на стандартах в области географической информации/геоматики. Стандарты серии ISO 19100, разрабатываемые этим комитетом, постепенно заменяют спецификации OGC. Например, стандарты OGC Web Map Service, GML, Web Feature Service, Observations and Measurements и Simple Features Access уже стали стандартами ISO. OGC активно сотрудничает с более чем 20 международными организациями, работающими в сфере стандартизации, включая World Wide Web

Consortium (W3C), Organization for the Advancement of Structured Information Standards (OASIS), Internet Engineering Task Force (IETF).

**OGC Sensor Web Enablement (SWE)** – набор стандартов для описания, управления и поиска датчиков в веб-пространстве. Стандарты позволяют сохранять возможность использования ранее разработанных приложений и в то же время предотвращают привязку к конкретным программным продуктам, что расширяет круг возможных пользователей и предоставляет возможности развития.

Основные принятые или ожидающие рассмотрения стандарты OGC в структуре SWE включают:

- Observations & Measurements (O&M) – наблюдения и измерения;
- PUCK Protocol Standard – стандарт протокола PUCK, определяет протокол для получения описания, кода «драйвера» датчика и другой информации от самого устройства, что обеспечивает автоматическую установку, настройку и работу датчика;
- Sensor Model Language (SensorML) – язык моделирования датчиков;
- Sensor Observation Service (SOS) – служба наблюдения за датчиками;
- Sensor Planning Service (SPS) – служба планирования датчиков (SPS), открытый интерфейс для веб-службы, с помощью которого клиент может определить возможность сбора данных с одного или нескольких датчиков или моделей и отправить запросы на сбор;
- SWE Common Data Model – общая модель данных SWE, определяет модели данных низкого уровня для обмена данными, связанными с датчиками, между узлами инфраструктуры SWE;
- SWE Service Model – модель службы SWE, определяет типы данных для общего использования в службах OGC Sensor Web Enablement (SWE). Пять из этих пакетов определяют типы запросов и ответов на операции.

#### **Модель службы SWE – SWE Service Model**

Стандарт в настоящее время определяет восемь пакетов с типами данных для общего использования в службах SWE. Пять из этих пакетов определяют типы запросов и ответов на операции. Это следующие пакеты:

- Contents – определяет типы данных, которые могут использоваться в предоставлении доступа к датчикам;
- Notification – определяет типы данных, которые поддерживают предоставление метаданных о возможностях уведомления службы, а также определение и кодирование событий;
- Common – определяет типы данных, общие для пакетов;
- Common Codes – определяет часто используемые списки кодов со специальной семантикой;
- DescribeSensor – определяет типы запроса и ответа для получения метаданных о данном датчике;
- UpdateSensorDescription – определяет типы запроса и ответа операции, используемой для изменения описания данного датчика;
- InsertSensor – определяет типы запроса и ответа при добавлении датчика;
- DeleteSensor – определяет типы запроса и ответа для удаления датчика.

### Референсная (эталонная) модель OGC

OGC создан документ, содержащий обзор стандартов OGC – OGC Reference Model [3], их связь со стандартами ISO, рекомендации по разработке сервисов. Эти рекомендации могут быть использованы при проектировании приложений.

Взаимодействие в среде веб-сервисов строится по шаблону «Publish, Find and Bind» – публикация, поиск и связь (рис.1). Поставщики (провайдеры) публикуют и делают доступными свои ресурсы, клиенты (пользователи и приложения) находят нужные им ресурсы, получают доступ к ним и используют их. Ресурсами могут быть устройства или информация.

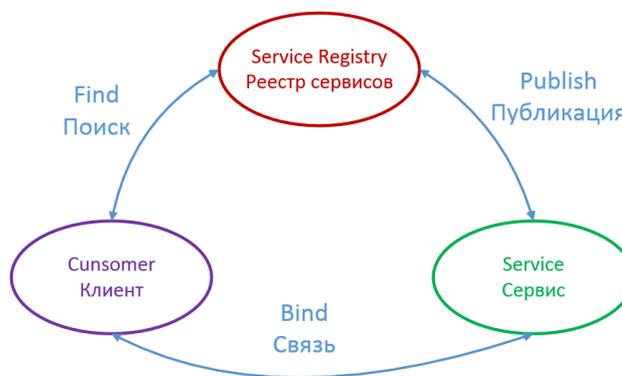


Рисунок 1– Шаблон проектирования «Publish, Find and Bind»  
(публикация, поиск и связь)

Работа с датчиками в распределенных ИИС, облачных ИИС, Интернете вещей соответствует этому шаблону [4]. Поставщик физического датчика (ресурс) регистрирует датчик, описывая его так, чтобы заинтересованные пользователи могли найти его – Publish. Пользователи находят датчик – Find и подписываются на него, подключая к своим приложениям – Bind. В облачных ИИС для каждого пользователя будет создаваться свой виртуальный датчик [4, 5].

На рис.2 показана архитектура референсной модели интерфейса каталога OGC. Архитектура представляет собой многоуровневую структуру клиентов и серверов. Чтобы обеспечить контекст, архитектура показывает больше, чем просто интерфейсы каталога. Жирные линии показывают объем каталога OGC.

Клиентское приложение, показанное на рис.2, взаимодействует со службой каталога с помощью интерфейса каталога OGC. Служба каталога может использовать один из трех источников для ответа на запрос службы каталога: хранилище метаданных, локальное для службы каталога, служба ресурсов или другая служба каталога. Интерфейс к локальному хранилищу метаданных является внутренним по отношению к службе каталога. Интерфейс службы ресурсов может быть частным или интерфейсом OGC. Интерфейс между службами каталога – это интерфейс каталога OGC. В этом случае служба каталога действует как клиент и как сервер. Данные, возвращаемые из запроса службы каталога OGC, обрабатываются запрашивающей службой каталога для ответа на запрос.

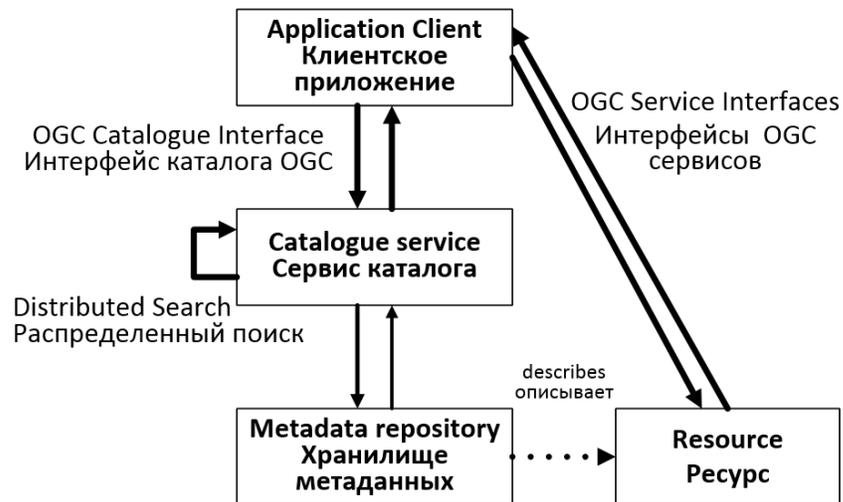


Рисунок 2 – Архитектура эталонной модели [3]

Модель использования датчика как сервиса, построенная в соответствии с архитектурой эталонной модели, показана на рис.3.

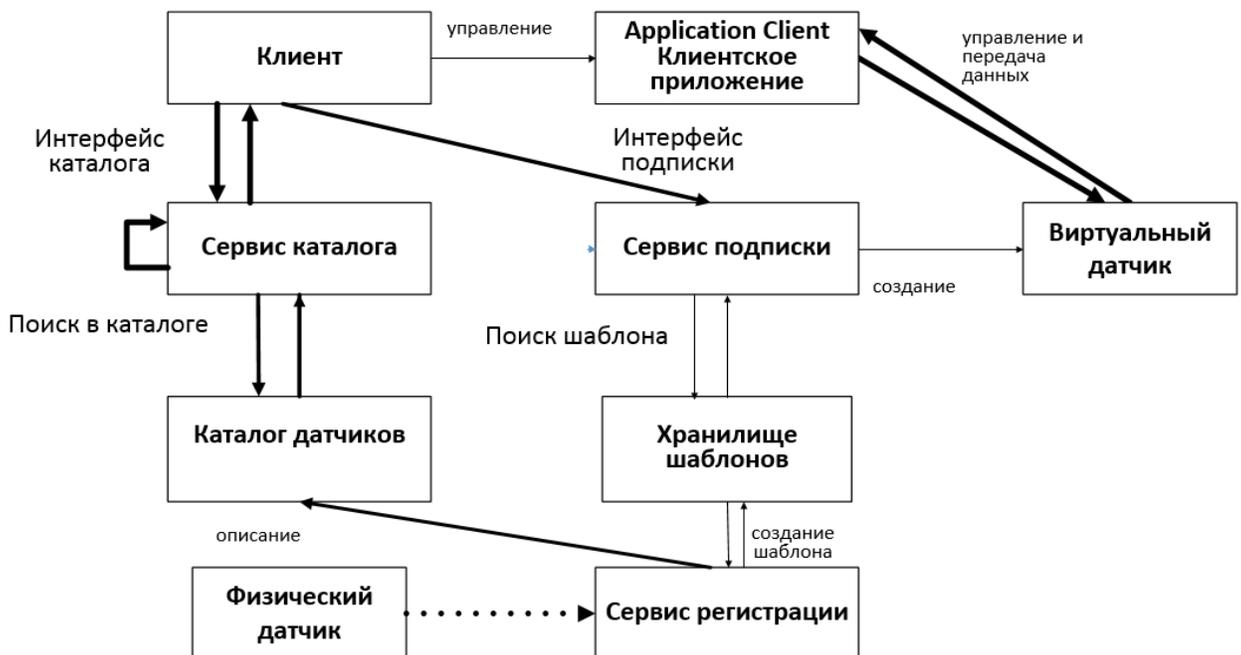


Рисунок 3 – Модель использования физического датчика как услуги

Здесь клиент – веб-приложение для пользователя датчика, которое через интерфейс каталога обеспечивает просмотр и выбор нужного датчика. Интерфейс каталога является внутренним интерфейсом облачной/распределенной ИИС. Когда датчик выбран (FIND), пользователь подписывается на него (BIND), при этом используется интерфейс подписки – также внутренний интерфейс ИИС. Сервис подписки запрашивает шаблон датчика в хранилище шаблонов и создает виртуальный датчик для пользователя. Клиент подключает виртуальный датчик к своему приложению через свой частный интерфейс или внешний интерфейс ИИС. Важно, чтобы частный интерфейс и виртуальный датчик использовали стандарты описания датчиков, измерений и физических процессов. Хотя, в общем, можно описать практически любой датчик и создать виртуальный датчик таким образом, чтобы он точно соответствовал формату интерфейса приложения.

Для появления в системе физический датчик должен быть зарегистрирован владельцем через сервис регистрации (PUBLISH), при этом описание датчика, соответствующее стандарту, попадает в каталог датчиков, для него создается новый шаблон, если датчиков такого типа нет в системе или ему назначается («привязывается») уже существующий шаблон. По шаблону при подписке на этот датчик будет создаваться соответствующий виртуальный датчик.

### OGC Web Services (OWS) – веб-сервисы OGC

Особенное внимание OGC уделяет стандартам доступа к информации через веб-сервисы, эти стандарты объединяют названием OGC Web Services. Схема на рис.4 представляет среду Web-сервисов OGC, которые используются в системах сбора и представления данных с учетом местоположения. Здесь представлены утвержденные стандарты (голубой цвет) для интерфейсов, кодирования, профилей, схем приложений и документов и документы, находящиеся на рассмотрении (коричневый цвет), – кандидаты в стандарты. Стандарты объединены в группы – группа стандартов для клиентских приложений, сервисов каталогов, кодировки, сервисы для работы с данными, сервисы для публикации и обработки.

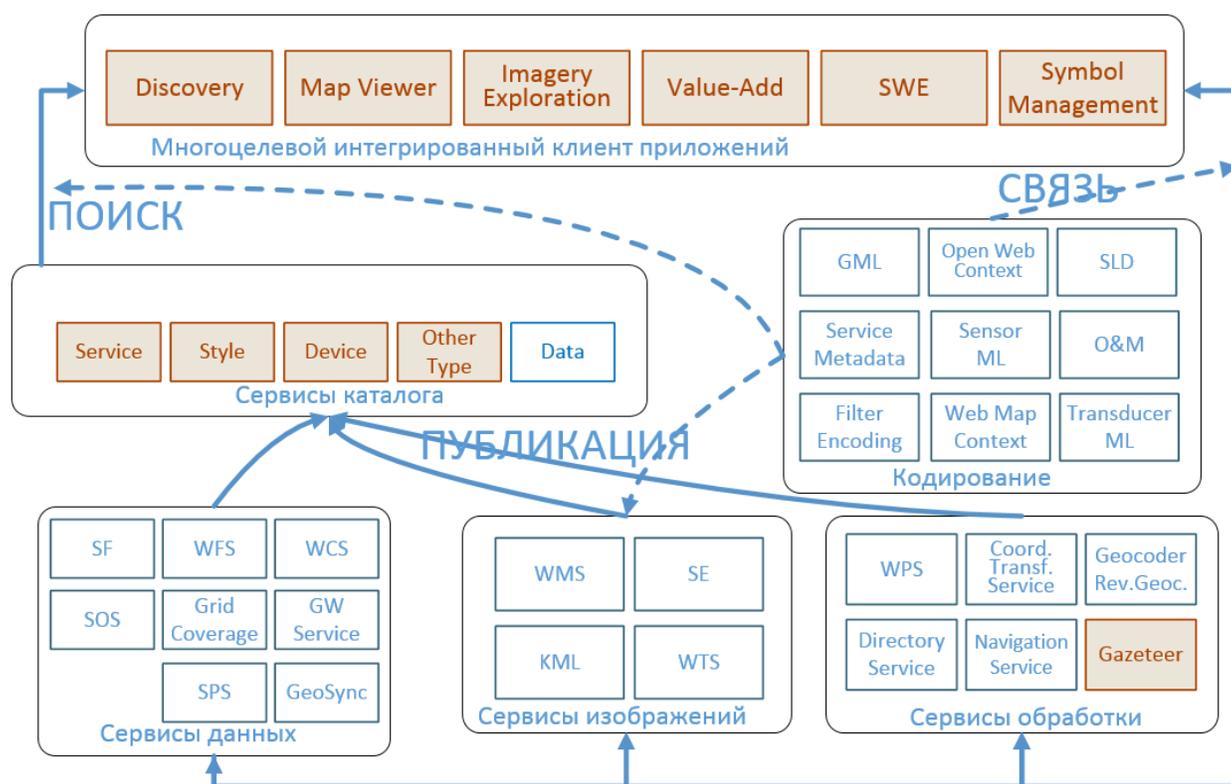


Рисунок 4 – Общая архитектурная схема для OGC Web Services [6]

Рассмотрим некоторые из стандартов веб-сервисов, которые могут быть использованы в модели использования датчика как услуги в распределенных и облачных ИИС.

**Сервисы каталога, Catalogue Service for the Web (CSW, CS-W)** – сервис каталога. Стандарт определяет схему проектирования и интерфейс для публикации и поиска информации, содержащей пространственные и другие данные и описывающей сервисы и другие объекты (метаданные): Z39.50[7], CORBA и HTTP. Поставщики ресурсов используют каталоги для регистрации метаданных, соответствующих выбранной информационной модели, включающей геопространственную и тематическую информацию. Клиентские приложения используют каталоги для поиска данных и сервисов [8]. Все реализации веб-сервисов должны поддерживать формат запросов и возвращаемой информации стандарта Catalogue Services Implementation Standard (CAT).

Синтаксис записи каталога соответствует кодировке метаданных на основе XML Dublin Core [9].

Общая информационная модель описывает грамматику в форме Бэкуса-Наура [10] для языка запросов, набор основных атрибутов и общий формат записи, возвращаемой запросом. Язык запросов должен поддерживать логические операции, операции совпадения текста, типы данных для времени и пространственные операции. Минимальный синтаксис основывается на операторе SQL SELECT и выражении WHERE. Спецификация фильтра – реализация языка запросов, который может быть преобразован в язык запросов каталога OGC CommonQL. OGC CommonQL является основным языком, который должен поддерживаться сервисами каталога [8]. Основные элементы каталога, по отношению к которым можно строить запросы, показаны в таблице 1.

Таблица 1. Основные элементы каталога [8]

Наименование	Определение	Тип данных
Subject	Тема	CharacterString
Title	Наименование ресурса	CharacterString
Abstract	Описание содержимого ресурса	CharacterString
AnyText	Цель для полнотекстового поиска среди символьных данных в каталоге	CharacterString
Format	Физическое или цифровое воплощение ресурса	CharacterString
Identifier	Уникальный идентификатор записи каталога	Identifier
TemporalExtent	Дата или период создания описания контента в метаданных	Date-8601
Modified	Дата создания или обновления записи в каталоге. Термин Dublin Core Metadata DCMI [http://dublincore.org/documents/dcmi-terms/]	Date-8601
Type	Характер или тип содержимого ресурса. Тип может включать общие категории, типы или уровни агрегирования контента. CharacterString taken from an authoritative list of CharacterStrings or Identifiers. The authority may optionally be identified in the value	CodeList
BoundingBox	Прямоугольник, обозначающий географическую область, приводятся восточная и западная долгота, северная и южная широта. Same semantics as EX_GeographicBoundingBox in ISO 19115.	BoundingBox см. []
CRS	Система координат (Coordinate Reference System) для BoundingBox. If not supplied, the BoundingBox CRS is a Geographic CRS with the Greenwich prime meridian.	Identifier
Association	Полное обозначение отношения один-к-одному	Association см.

Поля Subject, Title, Abstract, Format, Identifier, Type унаследованы из Element Set, version 1.1:ISO Standard 15836-2003 [9]. Subject рекомендуется описывать ключевыми словами, фразами или кодами, которые лучше всего выбирать из формальной классификации. Association (ассоциация) описывается идентификаторами ресурса-цели и ресурса-источника и наименованием отношения в виде кода или идентификатора. UML диаграммы классов и операция для реализации каталога также приводятся в [8].

**SensorML, OGC Sensor Model Language (SensorML)** – стандарт кодирования, который описывает информационную модель и кодировку XML для описания датчиков (актуаторов) и процессов измерения. Представляемые данные позволяют искать датчики, подключённые к сети Интернет, ставить задачи этим датчикам, а также использовать результаты наблюдений с датчиков. В рамках этого контекста SensorML позволяет разработчикам определять модель и схему XML для описания любого процесса, включая измерения системой датчиков и постобработку. [11]. SensorML позволяет:

- описывать датчики и системы датчиков;
- представлять информацию о датчике или процессе для определения источников и результатов измерений;

- представлять информацию для поддержки обработки и анализа результатов наблюдений;
- представлять информацию о местоположении полученных значений с датчиков (измеренных данных);
- представлять информацию о характеристиках датчика (например, точность, порог и др.);
- описывать процесс, посредством которого наблюдение было получено;
- описывать цепочки исполняемых процессов для получения новых информационных продуктов по требованию (например, выводимые наблюдения);
- накапливать основные свойства и предположения относительно систем датчиков.

Отдельная схема SensorML описывает конкретный датчик или массив датчиков и может размещаться в каталоге.

В системе в виде словаря должно присутствовать описание физических явлений и свойств, подлежащих измерению, это свойство (сущность) **ObservableProperty**. **ObservableProperty** – физическое свойство явления, которое можно наблюдать и измерять (например, температура, гравитационная сила, положение, химическая концентрация, ориентация, количество людей, состояние физического переключения и т.д.), или характеристика одного или больше типов признаков, значение которых должно быть оценено путем применения некоторой процедуры в наблюдении. Таким образом, это физическое воздействие, которое может быть обнаружено детектором или создано исполнительным механизмом; содержит идентификатор и описание (definition). **ObservableProperty** может также включать имя и описание. **ObservableProperty** не включает единицы измерения, качество измерения или ограничения, поскольку они обычно являются характеристиками процедуры измерения, а не свойствами самого наблюдаемого явления.

Датчики, актуаторы и процессы измерения описываются как сущность **DescribedObject**. **DescribedObject** содержит уникальный идентификатор объекта, поля описаний (используются при поиске объекта, это могут быть ключевые слова, описания, классификаторы), ограничения (**validTime** – временные, безопасности – **securityConstraints**, юридические – **legalConstraints**), квалификаторы (характеристики и возможности), ссылки (контакты, документация), история. Каждый из типов полей сгруппирован в списки, которые позволяют легко разделить и проанализировать свойства датчика. При необходимости может быть добавлено свойство **Extension Property**, которое позволяет добавить комментарии (например, о производителе, организации и т.д.).

**Observations and Measurements (O & M)** – наблюдения и измерения, стандарт описывает информацию, получаемую от датчиков и представляет собой XML-реализацию концептуальной модели наблюдений и измерений OGC и ISO (опубликован как ISO/DIS 19156). Этот стандарт тесно связан со стандартом OGC Sensor Observation Service (SOS) (сервис данных измерений). Стандарт определяет XML схемы для данных наблюдений, модели документов для обмена информацией в различных научных и технических сообществах, описывающие процессы измерений и их результаты [12]. Наблюдения/измерения могут производиться в точке, на кривой, поверхности.

Наблюдение в [12] определяется как действие, связанное с дискретным моментом или периодом времени, в течение которого свойству некоторого объекта (объект интереса) присваивается число, термин или другой символ. Наблюдение предполагает применение определенной процедуры – использование датчика, инструмента, алгоритма или цепочки процессов. Процедура может применяться на месте (*in-situ*) или дистанционно (*ex-situ*) по отношению к месту наблюдения.

Детали наблюдения важны для поиска данных и оценки их качества. Результат наблюдения является оценкой значения некоторого свойства интересующего объекта, а другие свойства наблюдения предоставляют контекст или метаданные, облегчающие

оценку, интерпретацию и использование результата. Наблюдение содержит информацию о месте наблюдения, типах результатов, результаты измерений, время измерения, параметры, описывающие специфику явления (они не должны быть связаны с процедурой измерения, при наличии такой связи они должны быть параметрами процедуры), оценку качества результата, диапазон, использованные процедуры, ограничения. Наблюдение может быть связано с другими наблюдениями, причем эта связь может быть отличной от пространственно-временных связей, тогда для понимания результата должен быть определен контекст наблюдения. Результат одного наблюдения может включать несколько измеренных значений, которые могли быть получены без изменения положения в пространстве или времени во время наблюдения, так и с изменением положения в пространстве или времени [12].

**Sensor Observation Service (SOS)** – сервис данных измерений (наблюдений) [13]. Этот стандарт определяет интерфейс веб-сервиса, который позволяет запрашивать наблюдения, метаданные датчиков, описание наблюдаемых характеристик. Также стандарт определяет операции для регистрации новых датчиков, новых измерений и удаления существующих. Интерфейсы и операции для доступа к результатам измерений применимы ко всем системам датчиков, включая удалённые, локальные, фиксированные и мобильные датчики. Результаты запросов представляются в стандартном формате наблюдений и измерений (O&M) и в соответствии со спецификацией [13].

Обязательные операции SOS:

- **GetObservation** – получение доступа к результатам наблюдений и измерений при помощи пространственно-временных запросов, которые могут быть отфильтрованы по явлению;
- **GetCapabilities** – метаданные сервиса SOS;
- **DescribeSensor** – информация о датчиках, процессах и платформах в SensorML.

Дополнительные операции дают возможность получения серии данных для одного набора датчиков без повторения метаданных, получение только времени измерения и результата (**GetResult**), получить информацию об интересующем объекте (**GetFeatureOfInterest**, **GetFeatureOfInterestTime**, **GetFeatureOfInterestType**), создать описания объектов (**DescribeFeatureOfInterest**, **DescribeObservationType**, **DescribeResultModel**), зарегистрировать датчик (**Register Sensor**) и добавлять наблюдения (**InsertObservation**).

**Sensor Planning Service (SPS)** SPS – сервис планирования датчика. Стандарт интерфейса сервиса (службы) планирования датчиков (SPS) определяет интерфейсы запросов для получения информации о возможностях датчика и позволяет: определить выполнимость запроса на планирование датчика; подать и зарезервировать / зафиксировать запрос; узнать о статусе запроса; обновить или отменить запрос. Также сервис позволяет запрашивать информацию о других веб-службах OGC, которые предоставляют доступ к данным, собранным запрошенной задачей [14].

**Стандарт кодирования KML (KML)** KML – язык визуализации на двумерных веб-картах и трехмерных браузерах; язык на основе XML, предназначенный для визуализации географической информации (двумерной и трехмерной), включая аннотации к картам и изображениям. KML является дополнением к большинству существующих спецификаций OGC, включая такие ключевые стандарты, как GML (Geography Markup Language), WFS (Web Feature Service) и WMS (Web Map Service). В настоящее время KML (v2.1) использует некоторые элементы геометрии GML (версия 2.1.2). Эти элементы включают в себя точки, линии, замкнутые линии и полигоны.

**Стандарт кодирования GML**

Стандарты OGC и стандарты ISO для описания устройств и данных используют OGC язык GML (Geography Markup Language). GML – язык разметки для пространственных данных на основе XML, разработанный OGC. GML основан на абстрактной географической модели, разработанной OGC, использующей географические,

или пространственные, объекты. Объект обладает различными свойствами и геометрией. Свойства имеют обычное название, тип, описание значения. Геометрия состоит из основных геометрических составляющих – точек, линий, кривых (полилиний), поверхностей и многоугольников (полигонов). Кодировка GML позволяет описывать сложные объекты, включающие другие объекты. Геометрия географического объекта также может состоять из многих геометрических элементов. Таким образом, геометрически сложный объект может состоять из сочетания типов геометрии, включая точки, линейные цепочки и многоугольники.

### **Заключение**

Существующее многообразие датчиков и сенсорных устройств требует стандартизации описания как самих устройств, так и измерительной информации, приемов ее обработки, стандартов отображения и сопряжения датчиков во Всемирной паутине. OGC разработал не только стандарты описания датчиков и данных измерений, но и стандарты веб-сервисов. В статье описываются стандарты OGC, касающиеся работы с датчиками, а также архитектура эталонной модели веб-сервиса для доступа к ресурсу. При предоставлении доступа к данным измерений и самим датчикам (датчик как услуга) через Интернет важно, чтобы описание как доступной информации, так и самих устройств было выполнено так, чтобы потенциальные пользователи могли ее обнаружить и использовать, и стандарты OGC Sensor Web Enablement как раз позволяют это сделать. Рекомендации по архитектуре веб-сервисов также будут полезны при разработке собственных веб-приложений. Следует обратить внимание также на тесную связь стандартов SWE со стандартами на геоинформацию, так для наблюдений/измерений важна фиксация места и момента измерения, что позволяет не только отображать датчики и результаты измерений на карте, но и проводить пространственный и временной анализ данных измерений, в том числе получаемых дистанционно и с помощью мобильных датчиков.

### **Литература**

1. Open Geospatial Consortium, URL: <https://ogc.org/> (дата обращения 25.11.2021)
2. Технические комитеты. ISO/TC 211. Geographic information/Geomatics <https://www.iso.org/ru/committee/54904.html> (дата обращения 25.11.2021)
3. OGC Reference Model, URL: <https://www.ogc.org/standards/orm> (дата обращения 25.11.2021)
4. Mihui Kim, Mihir Asthana, Siddhartha Bhargava, Kartik Krishnan Iyyer, Rohan Tan-gadpalliar, Jerry Gao, Developing an On-Demand Cloud-Based Sensing-as-a-Service System for Internet of Things // Journal of Computer Networks and Communications, Volume 2016, Article ID 3292783, 17 pages.
5. Авельцов, Д. О. Разработка модуля виртуализации сенсорных устройств для распределенных информационно-измерительных систем / Д. О. Авельцов, В. В. Гайдамако // Проблемы автоматизации и управления. – 2020. – № 1(38). – С. 89–103. – DOI 10.5281/zenodo.3904148.
6. Стандарты Open Geospatial Consortium, URL: <https://ad hoc.osgeo.org/livedvd/docs/ru/standards/standards.html> (дата обращения 25.11.2021)
7. Information Retrieval (Z39.50): Application Service Definition and Protocol Specification, URL: <http://www.loc.gov/z3950/agency/Z39-50-2003.pdf> (дата обращения 25.11.2021)
8. OGC® Catalogue Services 3.0 - General Model, URL: <http://docs.opengeospatial.org/is/12-168r6/12-168r6.html> (дата обращения 25.11.2021)

9. An XML Encoding of Simple Dublin Core™ Metadata, URL: <https://www.dublincore.org/specifications/dublin-core/dcmes-xml/2001-04-11/> (дата обращения 25.11.2021)
10. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Форма\\_Бэкуса\\_—\\_Наура](https://ru.wikipedia.org/wiki/Форма_Бэкуса_—_Наура) (дата обращения 25.11.2021)
11. OGC SensorML: Model and XML Encoding Standard, URL: <http://docs.ogc.org/is/12-000r2/12-000r2.html> (дата обращения 25.11.2021)
12. Observations and Measurements - XML Implementation, URL: [https://portal.ogc.org/files/?artifact\\_id=41510](https://portal.ogc.org/files/?artifact_id=41510) (дата обращения 25.11.2021)
13. OpenGIS Sensor Observation Service, URL: <https://www.ogc.org/standards/sos#:~:text=OpenGIS%20Sensor%20Observation%20Service> (дата обращения 25.11.2021)
14. Sensor Planning Service (SPS), URL: <https://www.ogc.org/standards/sps> (дата обращения 25.11.2021)

УДК 004.8+796

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ФИЗИЧЕСКОМ ВОСПИТАНИИ

*Коробко Ю.В.*

*Государственное бюджетное общеобразовательное учреждение города  
Москвы "Школа № 2048"*

Искусственный интеллект (ИИ) в настоящее время влияет на все аспекты повседневной жизни, включая и образование. Он может оказывать существенную поддержку учащимся посредством прогнозирования академической успеваемости или необходимости временного прекращения обучения. Пока что исследования в области искусственного интеллекта находятся на ранних стадиях, и поэтому необходимо изучить, как эта область развивается и увеличивает свой потенциал с течением времени. Исследовав ИИ в физическом воспитании (ФВ), мы можем предложить его потенциальное использование в спортивных приложениях и внести изменения в концепцию ФВ, обеспечив его визуализацию и повторяемость. Основываясь на концепции использования ИИ в смежных областях, в этой работе освещаются принципы его использования в физкультуре, а также предоставляется целенаправленный, углубленный анализ областей физкультуры, в которых ИИ может быть применен для индивидуальных занятий, обмена знаниями, оценки учащихся и автоматизированных методов консультирования учащихся.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект; физическое воспитание; методика обучения; индивидуальные занятия.

### **Введение**

Известный научно-фантастический сюжет сейчас стал ключевой функцией современного искусственного интеллекта: пользователи начали взаимодействовать с аппаратными и программными технологиями на основе ИИ, а приложения на основе ИИ стали частью нашей повседневной жизни. В работе [1] резюмируется, что ИИ обладает двумя возможностями: он может выполнять рутинные, повторяющиеся задачи, предсказывая результаты на новых данных, по данным, ранее классифицированным людьми, и принимать решения с помощью разработанных человеком алгоритмов. ИИ усваивает заданные исходные данные, многократно повторяя процесс обучения на основе обратной связи и предоставляя альтернативные результаты, показывает возможные пути принятия решений для людей.

Научно-технический прогресс не только влияет на изменения в содержании и методах обучения, но и изменяет систему образования, образовательные модели и типы образовательных систем и организаций [2]. В настоящее время недостаточно освещен вопрос о внедрении современных образовательных технологий, или о том, как решать проблемы, возникающие в системе образования, используя существующие результаты применения образовательных технологий для машинного обучения, или о том, как наилучшим образом использовать образовательные ресурсы и повышать эффективность образования за счет общей реконструкции образования. Поэтому исследование интеллектуальных образовательных технологий весьма актуально и именно сейчас имеет большое значение.

Образование в любом возрасте должно подготовить общество к будущему и помочь людям достичь самореализации. Образование в эпоху искусственного интеллекта – это одновременно и проблема, и новая возможность. Разрабатываются новые направления обучения, в том числе системы управления обучением на основе цифровых учебников, индивидуальное обучение с помощью анализа больших данных, технология взаимодействия распознавания и синтеза речи, а также вспомогательные чат-боты, которые работают с помощью технологии обработки естественного языка (NLP, Natural Language Processing). Большинство технологий искусственного интеллекта находят применение в сфере образования и управления образованием. Технология прогностического анализа с использованием искусственного интеллекта может обеспечить специальную поддержку для учащихся с различными проблемами

посредством оценки, прогнозирования уровней сложности обучения и академической успеваемости или отстранения от обучения, поэтому они должны быть включены в курсы повышения квалификации для учителей.

С самого начала своего развития искусственный интеллект пробуждал воображение и мечты людей, и с тех пор технология ИИ широко проникла во все сферы жизни с точки зрения концепции, метода и технологии. ИИ как область компьютерных наук имеет сейчас множество областей применения и направлений исследований [3]. Методология физического воспитания относится сейчас к спорту, образованию, информатике и в некоторой мере к другим областям. Искусственный интеллект может обеспечить решение практических проблем в области разработки спортивных образовательных технологий. Таким образом, более конкретные цели и темы исследований в области искусственного интеллекта должны быть разработаны путем изучения информации в области информационных технологий, компьютерных сетей и сетевых технологий.

Физическое воспитание (физкультура) является важным школьным предметом для всестороннего развития человека. Использование современных технологий, включая искусственный интеллект, в рамках современного образования теоретически обогащает содержание образования, изменяет восприятие образования и вносит изменения в традиционные модели образования. ИИ также обладает потенциалом для повышения практичности образования для учащихся, восстановления физической формы и содействия непрерывному развитию. Однако на сегодняшний день было опубликовано мало исследований по применению искусственного интеллекта к физкультуре, несмотря на его важность для подготовки к будущей системе образования.

Таким образом, эта работа направлена на определение принципов приложения ИИ для ФВ, основанных на концептуализации и переноса знаний из других областей применения искусственного интеллекта. Целью исследования было ответить на следующий вопрос: каковы основные концепции и принципы ИИ и как он может быть применен к ФВ с использованием этих основных принципов?

Итак, искусственный интеллект реализует человеческие способности к обучению, мышлению и восприятию, а также способность понимать естественный язык в рамках компьютерного алгоритма. Это раздел компьютерных наук и информационных технологий, изучающий, как компьютеры могут мыслить, обучаться и выполнять задачи, которые ранее считались достижимыми только для человеческого интеллекта. Это позволяет компьютерам имитировать разумное поведение человека. Согласно авторам работы [4], ИИ – «это машинный или компьютерный интеллект, охватывающий различные междисциплинарные области, в которых происходит обучение. В результате получается система, способная выполнять конкретные задачи, такие, как, например, игра в шахматы, доказательство математических теорем, написание стихов и диагностика заболеваний». Автор [5] определил ИИ как совокупность алгоритмов, копирующих человеческий интеллект, утверждая, что ИИ охватывает построение теории интеллекта и обработки информации. То есть в ИИ необработанные данные фильтруются с помощью некоторой искусственной модели, в результате чего создается значимое представление исходных данных и в конечном итоге формируются данные, которые могут удовлетворить потребности пользователей.

Искусственный интеллект может выполнять автоматизированные задачи, причем выполнять задачи быстрее и эффективнее, поддерживая более плодотворное принятие решений и, в конечном счете, реализовать процессы принятия решений без участия людей. ИИ имитирует человеческие чувства, мысли и действия [6]. «Чувства» можно использовать для анализа изображений и видео с использованием сенсорного искусственного интеллекта, который может имитировать человеческие способности в распознавании лиц, анализе голоса и текста. «Мысли» можно скопировать с помощью алгоритмов машинного обучения и глубокого обучения с использованием когнитивного

ИИ, а «действия» можно скопировать у людей при создании управляющей системы с использованием обучения с подкреплением.

Недавние примеры искусственного интеллекта показали, что компьютеры могут научиться мыслить, как люди, и что приложения на основе искусственного интеллекта иногда могут работать лучше, чем люди. Наиболее представительным является AlphaGo от Google DeepMind, который в 2016 году опередил лучших игроков в Го в мире. Эти результаты продемонстрировали человекоподобное мышление ИИ и подтвердили, ИИ может быть самообучающимся [7].

ИИ прямо или косвенно связан со многими другими областями информатики. В настоящее время активно предпринимается множество попыток внедрить технологии искусственного интеллекта в различные области информационных технологий и использовать их для решения проблем [8] совершенно разного рода.

### **Области применения искусственного интеллекта**

Искусственный интеллект – это всеобъемлющая передовая область исследований, развивающаяся в области компьютерных наук, системного анализа и вычислительной математики. Ученые, проводящие исследования в области искусственного интеллекта, должны обладать знаниями в ИТ-области, математике, глубоком обучении, статистике и т.д. Кроме того, поскольку мы стремимся применять искусственный интеллект в физкультуре, мы должны понимать физкультуру и методологию физического воспитания.

Итак, целью искусственного интеллекта является разработка алгоритмов, которые заставляют компьютеры мыслить, как люди. Исследования в области искусственного интеллекта связаны с конкретными областями, в основном с экспертными системами, машинным обучением, распознаванием образов, пониманием естественного языка, автоматизированным предоставлением результатов вычислений, автоматизированным генерированием программного кода, робототехникой, теорией игр, интеллектуальной системой поддержки принятия решений и искусственными нейронными сетями. Таким образом искусственный интеллект ориентирован на прикладную сферу. По мере развития ИИ его применение в образовании расширяется.

Технологии, используемые при внедрении искусственного интеллекта, сильно различаются. В этой работе рассматриваются машинное обучение, глубокое обучение NLP – основные технологии, используемые при практическом внедрении искусственного интеллекта в настоящее время. Также нами кратко рассматриваются системы машинного обучения для распознавания видео и голоса, доказательства теорем и виртуальная реальность.

Согласно автору работы [9], машинное обучение – это разработка методов повышения производительности компьютера при решении интеллектуальных задач на основе наблюдаемых данных. Он утверждает, что машинное обучение может идентифицировать объекты, лица, слова и биржевые акции. То есть машинное обучение может использовать существующие данные для прогнозирования будущего. Алгоритмы машинного обучения дают более точную информацию при правильном обучении и могут моделировать реальность более четко и компетентно, чем аналитическое создание моделей обработки данных. Таким образом, машинное обучение определяют как создание обучающихся моделей, направленных на достижение практически значимого результата.

В системе машинного обучения компьютеры обучаются выполнению задач анализа данных, поставленных учеными. Машинное обучение было разработано для использования в прикладном программном обеспечении и применяется в таких приложениях, как компьютерное зрение, распознавание речи, NLP и управление роботами.

Во всем мире имеется множество данных, которые исследователи могут использовать для анализа и принятия соответствующих мер для решения конкретных задач. Данные больше не являются просто числами, это нечто более сложное, чем было

принято считать ранее. Однако увеличение объема данных, должным образом собранных и проанализированных, повышает точность принятия решений. Согласно авторам [10], много данных о различных вопросах можно собирать с помощью мобильных устройств или компьютеров, а алгоритмы машинного обучения могут извлекать из них закономерности, адаптируясь к потребностям каждого человека и окружающей среде. Машинное обучение использует технологии на основе обучающихся алгоритмов, полученных с помощью математических и статистических методов и библиотек программ для выполнения конкретных задач.

### **Глубокое обучение**

Согласно [7], глубокое обучение является подмножеством машинного обучения (рис. 2) и концепции, впервые представленной Аланом Тьюрингом в 1950 году. Исследования Тьюринга были в первую очередь связаны с нейронными сетями, которые стимулировали идею машины с человеческими чертами, которые помогли бы повысить ее интеллектуальные способности.



Рисунок 2 – Взаимосвязь между искусственным интеллектом, машинным обучением и глубоким обучением

В работе [7] определяется глубокое обучение как «определенный вид машинного обучения, который представляет мир в виде модели наложенных друг на друга слоев, каждый из которых определяется как простая модель обработки данных, и все они обучаются как единое целое и формируют некоторое пространство гипотез, достигая большой мощности и гибкости». Глубокое обучение позволяет реально применять машинное обучение там, где различные поверхностные модели ограничены своей представительной способностью.

Принцип глубокого обучения заключается в получении результатов путем включения множества типов нейронных слоев в архитектуру нейронных сетей в определенном порядке и обработки данных разными уровнями до тех пор, пока не будут достигнуты окончательные результаты. Уилл Мейми, менеджер NVIDIA по вычислениям с помощью GPU, обсуждает в своем подкасте, что глубокое обучение выполняет совершенно особые задачи. С помощью глубокого обучения можно классифицировать различные типы изображений и прогнозировать покупательские предпочтения пользователей в системе цифрового маркетинга.

Оно также может быть использовано в медицинской визуализации для обнаружения или определения заболеваний легких [8]. Поскольку машины быстро обучаются, с использованием параллельной работы на множестве графических ядер точность работы на уровне человека может быть достигнута с помощью нейронных сетей, использующих для обучения большие данные.

### **Обработка естественного языка**

Natural Language Processing (NLP), также известное как компьютерная лингвистика, является подразделом аналитики данных, который связан с обучением компьютеров пониманию и созданию контента с использованием человеческого языка. Автор в работе

[11] назвал NLP областью инженерии, посвященной проектированию и внедрению компьютерных систем, основной функцией которых является анализ естественного языка. NLP требует сбора знаний и управления механизмами для систематического решения проблем с использованием множества алгоритмов, которые включают комбинирование слов в процессе синтеза речевых конструкций. Этот процесс требует сочетания обучения человеком и машинного мышления, поскольку он направлен на понимание устных или письменных команд, предоставляемых пользователями, которым требуются автоматическая справка, перевод текста или озвучивание текста. NLP описывают как область компьютерных технологий, в которой человеческий язык автоматически анализируется и выражается с помощью виртуальных сущностей.

Автор [5] подчеркивает, что компьютерным системам может быть трудно генерировать и понимать фрагменты естественного языка, такого как английский, из-за препятствий кодирования и декодирования. Однако многие исследователи сосредоточились на создании компьютерных программ, которые могут понимать выражения на английском языке, такие как «ЭЛИЗА» Вайценбаума и «СЭР» Рафаэля Делпа.

Леун, Бенио и Хинтон [12] утверждают, что понимание естественного языка следует рассматривать в контексте глубокого обучения, потому что оно уже давно используется для распознавания речи и рукописного ввода наряду с простыми рассуждениями. Одна из ключевых идей глубокого обучения, связанная с NLP, заключается в том, что если модель может быть обучена на разных уровнях представления для достижения конечной цели, а сама модель может освоить любой промежуточный уровень представления смысловой конструкции, необходимый для выполняемой в данный момент работы.

Таким образом, системы NLP, использующие глубокое обучение, уже нашли практическое применение. После дальнейших исследований, скорее всего, можно будет свободно обмениваться информацией посредством голосовой связи с компьютерами. Следовательно, использование компьютеров для этой цели также в свою очередь окажет большое влияние на технологию NLP.

### **Экспертные системы и другие технологии искусственного интеллекта**

Такие системы предназначены для обеспечения тех же навыков решения проблем, что и у экспертов, за счет того, что их знания, опыт и ноу-хау вводятся в компьютер. Это позволяет компьютерам заменять людей при выполнении определенных профессиональных задач (медицинская диагностика, юридическое суждение, оценка химической структуры и т.д.), и именно они стали первой областью искусственного интеллекта, которая достигла значительных успехов. Распознавание изображений и голоса использует такой искусственный интеллект для анализа изображений, собранных электронными датчиками. Эта технология может определять природу объектов или воспринимать человеческие голоса и преобразовывать звуки в предложения. Распознавание изображений и голоса являются ключевыми технологиями в распознавании символов в робототехнике и т.д. [13].

Виртуальная реальность – это технология компьютерного моделирования, которая может создавать и передавать впечатления от виртуальных миров. Виртуальная реальность сочетает в себе новейшие разработки в области компьютерной графики, мультимедиа, технологии человеко-машинного интерфейса, технологий телекоммуникаций, технологии параллельной обработки и других информационных технологий для создания виртуального мира. Это стимулирует стремление к восприятию информации, что приводит к появлению новых идей. Применение виртуальной реальности в физкультуре фокусируется на использовании ее функций для создания особых систем, использующих трехмерное пространство виртуальной реальности для построения моделей движения, основанных на физической активности человека.

Технология виртуальной реальности может использоваться не только для имитации реального мира, но также выходить за рамки реального мира и способствовать общению с реальными пользователями. Используя виртуальную реальность, ученики могут, кроме того, лучше понимать и осваивать образовательный контент [14].

### **Применение искусственного интеллекта в физкультуре**

Таким образом, искусственный интеллект изначально использовался в играх и доказательстве математических теорем, но сейчас он получил широкое распространение. Полезность приложений искусственного интеллекта в современной физкультуре становится все более очевидной, поскольку они сочетают в себе новые концепции и теории, которые были созданы наработками искусственного интеллекта в смежных областях. ИИ имеет потенциал для дальнейшего развития в физкультуре, учитывая, что в результате синтеза с другими областями разработана базовая теоретическая система, подходящая для этой цели. Усиление исследований базовой теоретической основы ИИ могло бы заложить концепцию для становления и развития современной физической культуры. В этом разделе рассматривается применение ИИ в различных областях физкультуры, таких как индивидуальные занятия по физкультуре, предоставление знаний, ИИ и оценка и консультирование учащихся, а также уровень и компетенции, необходимые будущим учителям физкультуры в контексте развития ИИ.

### **ИИ и индивидуальное обучение**

Во всем мире нынешняя школьная система является продуктом эпохи индустриализации и призвана обеспечить право на образование для всех граждан. До введения школьной системы образование было тем, чем могли пользоваться только привилегированные классы. Школьная система внесла большой вклад в развитие общества, поскольку она предоставляла всем гражданам преимущества образования. Однако в процессе создания системы образования для всех граждан была упущена ценная форма образования: индивидуальное образование. При проектировании массового образования, которое мы называем школой, была создана стандартизированная школьная структура, в которой один учитель отвечает за обучение нескольких учеников. Эта структура отдает учебные планы и оценку в руки поставщика, а не учащегося.

Чтобы обучение было эффективным, необходимо соответствующим образом диагностировать характеристики интересов и склонностей каждого учащегося, а также их академическую историю, уровень и скорость обучения. Однако в школе занятия проводятся в соответствии с заранее установленной учебной программой, и оценка дается только по результатам. Это стало структурной и системной проблемой с момента введения школьной системы. Чтобы компенсировать это, были предприняты усилия по изменению структуры классов различными способами, но отчуждение учащихся в классной среде остается нерешенной проблемой.

Адаптивные занятия физкультурой означают предоставление преподавательской поддержки, чтобы передать учащимся наиболее подходящий опыт обучения физкультуре, учитывая физическое состояние отдельных учащихся, уровень физической активности, психологические особенности и домашнюю обстановку. Следовательно, можно предположить, что все учащиеся смогут достичь своих целей с помощью индивидуальных занятий физкультурой.

Адаптивное обучение и индивидуальное образование, которые учитывают как учащихся, так и типы обучения, стали основными интересами в применении исследований ИИ в образовательных контекстах, предполагая, что использование ИИ в образовании направлено на удовлетворение требований учащихся и предоставление им предпочтительных возможностей обучения [15].

Индивидуальная физкультура, которая учитывает различные физические, умственные и социальные характеристики учащихся, может быть разделена на дифференцированные, индивидуализированные и персонализированные типы обучения

физкультуре. Дифференцированная физкультура включает занятия в небольших группах, в которых при выборе методов обучения учитываются скорость обучения учащихся и уровень предшествующего обучения, хотя содержание образования и цели учащихся одинаковы. Индивидуальные занятия предполагают, что учащимся преподаются индивидуальные уроки, при которых обучение адаптируется к их уровню и потребностям. Индивидуальные уроки имеют различные образовательные цели, содержание и методы обучения в зависимости от конкретного учащегося.

Для индивидуальных занятий физкультурой, которые включают и внедряют искусственный интеллект, улучшения и разработки должны быть сделаны не только в школьной системе, но и в экологических аспектах школы, таких как спортивное оборудование и спортивные залы. Такие изменения должны быть сосредоточены на «процессе преподавания-обучения». Необходим переход к гибкой школьной системе, а это означает, что должна быть создана гибкая система обучения, которая адаптируется к дозированию физических нагрузок для учащихся, соответствующих их уровню успеваемости и скорости обучения, с учетом различий между уровнями когнитивного и физического развития учащихся. Это позволило бы использовать различные методы обучения, отражающие индивидуальные потребности учащихся и результаты обучения. Однако уровень успеваемости должен поддерживаться при групповых играх с мячом или проектом обучения, которые требуют сотрудничества с другими учащимися.

Для индивидуальных занятий физкультурой, ориентированных на учащихся, физическое состояние отдельных учащихся, уровень достижения физической активности и психологические характеристики должны быть объективно измерены с помощью эмпирической оценки. Сенсорный ИИ может использоваться для объективного измерения уровня достижения физической активности в соответствии с физическим состоянием человека, позволяя идентифицировать его на основе распознавания лиц и анализа голоса, наряду с анализом изображений и видео физической активности. Такие измеренные данные затем могут быть проанализированы на платформах машинного и глубокого обучения с использованием когнитивных технологий для предоставления учащимся обоснованной оценки и обратной связи. Этот метод также может взаимодействовать с учащимися, используя естественный язык с помощью исполнительного ИИ, позволяя учащимся диагностировать и улучшать уровень своей успеваемости (рис. 2).

Для внедрения адаптивной физкультуры следует ввести индивидуальные учебные планы по физкультуре, основанные на автономии и личном опыте учителей. Оценка с помощью ИИ необходима для того, чтобы учащиеся могли добиться успеха в своем обучении, а не ориентировались на остальных и не конкурировали друг с другом за определение иерархии. Кроме того, оценка должна проверяться и управляться путем установления стандартов мастерства и уровней мастерства, которых стремятся достичь учащиеся. Также необходимы изменения в роли учителя физкультуры в школе. Его роль должна сместиться с «отправителя знаний», который преподаёт то, что предусмотрено стандартизированной учебной программой, на роль наставника, тренера и консультанта, который помогает ученикам успешно достигать целей обучения. Внедрение такой индивидуальной образовательной системы, ориентированной на учащихся, продвигает нас к достижению конечной цели образования – обеспечению успеха каждого учащегося.

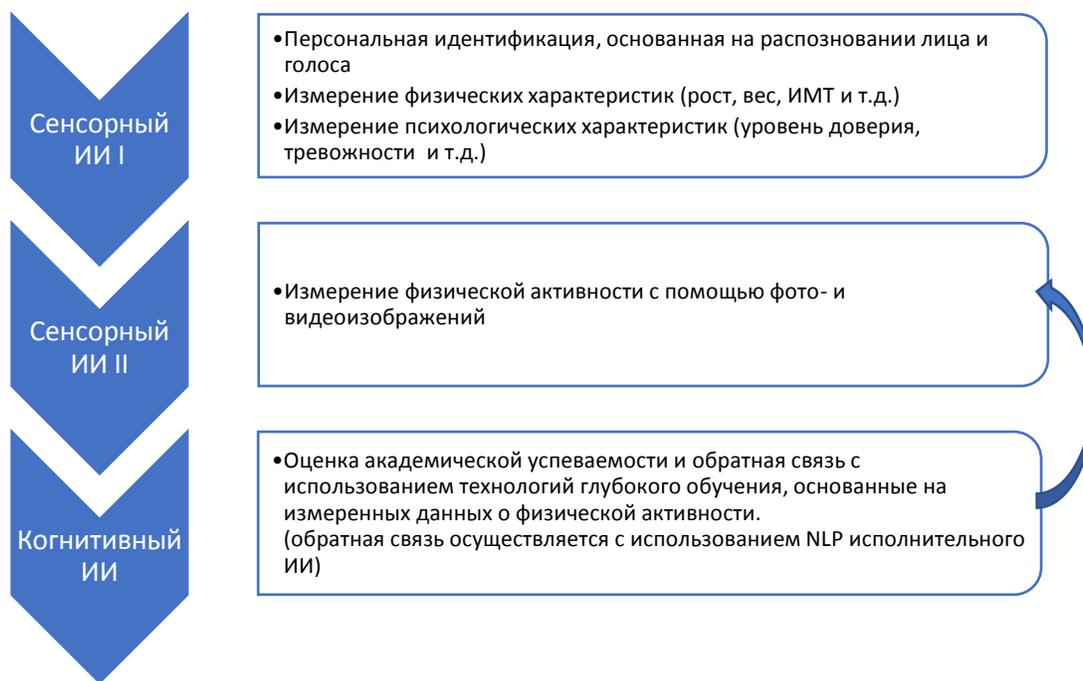


Рисунок 2 – Индивидуальные, ориентированные на учащихся, занятия физкультурой с использованием искусственного интеллекта

### Предоставление информации и знаний

Учителя физкультуры должны изучать учебные материалы и приобретать методологические инструменты для проведения занятий физкультурой и предоставления знаний о физической активности. Раньше, когда знаний было мало, учителя физкультуры были основным источником знаний. Однако применение искусственного интеллекта в образовании предложило индивидуальные знания благодаря огромному объему информации, представляемой глубоким обучением. В прошлом значительными знаниями владели и пользовались немногие избранные; но сейчас большинство людей имеют доступ к знаниям через Интернет, и современные технологии смогли предложить удобный способ поиска нужной, что стало возможным благодаря глубокому обучению.

Способность ИИ накапливать знания и обладать ими также может обеспечить решение проблемы различий в степени владения знаниями и информацией, зависящих от социально-экономических факторов. ИИ можно было бы использовать для создания условий обучения для тех, кто не может посещать школу по тем или иным причинам, и его функции могли бы обеспечить непрерывное обучение. Искусственный интеллект может помочь учащимся разработать собственную программу обучения, выбрав те виды деятельности, которые они захотят. Системы искусственного интеллекта позволяют учащимся обновлять свои знания и решать задачи, соответствующие их уровню. Использование ИИ обеспечивает саморегулируемое обучение, позволяя отдельным учащимся достигать своих целей за счет такой стратегии обучения. С учетом собственных реакций на эффекты обучения и использованием независимых или синхронизированных с группой курсов.

Одним из величайших преимуществ искусственного интеллекта является то, что он в совокупности с технологией виртуальной реальности разрушает физическое и временное пространство. Если эти преимущества будут использованы в физкультуре, то, несмотря на возможные физические ограничения, могут быть реализованы многочисленные учебные ситуации. По словам автора работы [16], виртуальная реальность и дополненная реальность способствуют диверсификации учебных ситуаций и позволяют студентам учиться в 3D-среде с использованием специальных инструментов виртуальной реальности. Они проверили эффективность VR-контента как средства повышения

качества преподавания физкультуры, проанализировав эффекты уроков с использованием технологии VR в начальной школе. Их анализ показал, что урок оказал положительное влияние на воспринимаемые факторы своих физических способностей и факторы уверенности в физическом самовыражении.

### **Искусственный интеллект и оценка учащихся**

Анализ производительности, проводимый с использованием самообучающихся алгоритмов, все чаще обсуждается как имеющий перспективные приложения в спортивных исследованиях и деятельности, связанной с математикой и информатикой. Типичными примерами являются исследования, в которых использовались такие алгоритмы для оценки различных движений в таких видах спорта, как гольф, бейсбол, футбол и баскетбол. В работе [17] протестировали модели 138 квалифицированных пловцов с помощью технологий моделирования бионических систем и выявления талантливых пловцов, подтвердив, что модели на основе нейронных сетей показали свою эффективность на дистанциях 200 м и 400 м вольным стилем. В то время как другие авторы [18] разработали и обучили свои собственные карты кластеризации процессов прицеливания спортсменов-биатлонистов. Кроме того, была проверена эффективность самообучающихся алгоритмических карт кластеризации. Эти примеры демонстрируют очевидную пригодность ИИ для разработки эффективных систем оценки и обратной связи наряду с разработкой систем мониторинга, включающих модели классификации для анализа в реальном времени и получения обратной связи в каждом виде спорта.

Оценка учащихся с использованием ИИ может быть сосредоточена на внедрении методов распознавания образов для оценки результатов физической активности. Датчики, прикрепленные к телу учащегося и тренажерам, могут собирать данные, из которых можно вывести важные характеристики для каждого вида физической активности, позволяя оценивать измеренную физическую активность и дополнительные характеристики на основе общей методологии распознавания образов, включая методы автоматической классификации.

Разработка и внедрение инновационных систем, основанных на новейших информационных и телекоммуникационных технологиях, в сочетании с методами интеллектуального управления позволяют осуществлять немедленный сбор, передачу, хранение и анализ данных датчиков физической активности. Параметры, измеряемые этими датчиками, применяются для разработки интеллектуальных методов, использующих существующие концепции машинного обучения, что позволяет автоматически оценивать двигательные навыки и обеспечивать адекватную обратную связь с учащимися. Благодаря достижениям в области измерительной техники также развивается технология, которая интегрирует датчики в само оборудование и инструменты. Данные, собранные таким образом, могут быть использованы для реализации сложных процедур с использованием технологии машинного обучения для автоматического анализа физической активности.

Самообучающийся алгоритм, использующий анализ шаблонов в данных, разработанный и применяемый к различным школьным спортивным мероприятиям, позволит немедленно измерять физическую активность учащихся. Это обеспечит обратную связь, основанную на объективных данных, которые могут помочь учащимся улучшить свою физическую активность, а также могут быть эффективными в предотвращении травм. Кроме того, эти измерения и оценки, основанные на ИИ, могут помочь выявить и выбрать таланты, сделав спортивный потенциал молодежи более объективно идентифицируемым.

### **ИИ и консультирование учащихся**

Помимо вышеперечисленных методов применения искусственного интеллекта на курсах физкультуры, консультирование является еще одной ролью учителей физкультуры. И это такая роль, которая может быть применена с точки зрения отношений и норм. По словам автора работы [19], чат-бот используется для предоставления студентам

соответствующих ответов на основе алгоритмизированного разговора, чтобы предотвратить депрессию или другие нежелательные последствия. Если ИИ изучит большой объем информации, расширит свои возможности за счет глубокого обучения, в перспективе станет возможным консультирование, выходящее за рамки чат-бота. Автор в работе [19] предсказывает, что такая система будет разработана с использованием технологии искусственного интеллекта, которая превосходит человеческие способности. Она будет способна распознавать человеческие лица, выявлять по ним эмоции, а затем на основе своих знаний представлять необходимую информацию консультантам.

Консультирование учащихся с использованием искусственного интеллекта также вполне возможно. В физкультуре консультирование может быть необходимо для устранения препятствий между учащимися и требованиями образовательной системы, улучшения способностей людей к физической активности и развития их социальных навыков. Консультирование также необходимо для улучшения психологических факторов, связанных с физическими упражнениями. Использование искусственного интеллекта в таких консультациях, связанных с физкультурой, позволяет представить объективные и научно-обоснованные решения, соответствующие лучшим практикам консультирования и конкретного случая среди огромного количества данных и различных возможных ситуаций.

### **Роль будущих учителей физкультуры**

Итак, ожидается, что внедрение технологии искусственного интеллекта приведет к изменениям в различных аспектах человеческой жизни. Ожидается, что и в области физкультуры произойдут многочисленные изменения, и поскольку компьютеры, оснащенные искусственным интеллектом, более продуктивны в организации и представлении информации, чем люди, то можно предполагать, что роль учителей физкультуры будет все больше отклоняться от роли информатора. В противном случае высокий уровень способностей ИИ противопоставим преподавателям физкультуры, может привести к исчезновению преподавания физкультуры как чисто человеческой профессии.

В дополнение к обучению, созданию и модификации компьютерных алгоритмов в эпоху искусственного интеллекта, скорее всего, будет уделяться особое внимание наиболее человеческому содержанию и видам деятельности, таким, как, например, передача личного опыта учителей. Учитель физкультуры в будущую эпоху искусственного интеллекта будет обучать студентов наиболее важным видам человеческой деятельности, которые машины с искусственным интеллектом не могут использовать в качестве основного учебного материала. Будущие учителя физкультуры обсудят с учениками здоровый образ жизни, рассмотрят сущность спортивного мастерства и уроки спорта, а также изучат направление, в котором мир должен двигаться с помощью развития спорта.

Будущие учителя физкультуры должны будут эмоционально взаимодействовать с учениками и выступать в качестве администраторов, обеспечивая приемлемый уровень работы машин. Человеческая роль посланника знаний будет уменьшена. Однако роль учителей, которые помогают учащимся учиться самостоятельности и осваивать физические упражнения, станет более важной.

### **Результаты и обсуждение**

Таким образом, ожидается, что занятия физкультурой с использованием технологии искусственного интеллекта помогут не только учителям физкультуры, но и учащимся. Механическое, итеративное обучение, формализованные обсуждения и стереотипные оценки могли бы проводиться ИИ от имени учителей физкультуры. С точки зрения новой системы образования, искусственный интеллект обеспечит индивидуальное обучение, чтобы все учащиеся могли достичь индивидуальных целей в обучении.

Автор работы [20] считает, что отношения между учителями и учащимися будут приобретать все большее значение по мере того, как образование станет более

технологичным. ИИ позволит обеспечить справедливое обращение с учениками, повысить уровень их удовлетворенности обучением и снизить затраты на рабочую силу, в то время как роль учителей в распространении знаний будет снижена [61]. В то же время учителя физкультуры смогут сосредоточиться на общении и способствовать самостоятельному росту учащихся.

Кедингер и др. [21] считают, что это должно основываться на учебной программе в то время, когда учителя вводят то, что им нужно изучить, в систему обучения, основанную на ИИ. Это говорит о том, что необходимы совместные усилия всех стейкхолдеров для автоматизации системы образования – на учителя не должна возлагаться ответственность за все.

Основываясь на этих обсуждениях, взаимодополняющие роли учителей-людей и ИИ могут быть представлены, как показано на рис. 3. Другими словами, ИИ может быть обеспечено механическое итеративное обучение, персонализированное обучение, формализованное обсуждение, диверсификация обучения и формализованная оценка, которые относительно легко алгоритмизировать и реализовать. Предоставляя полную форму персонализированного образования и ряд различных форм учебных ситуаций, которые не могут быть идеально реализованы в текущей среде физического воспитания, ИИ может создать среду обучения, в которой учащиеся будут более заинтересованы в обучении и будут участвовать в этом процессе более активно. Переложив формализованную работу на ИИ, учителя-люди смогут больше сосредоточиться на других важных проблемах.



Рисунок 3 – Взаимодополняющие отношения между учителями-людьми и искусственным интеллектом

Таким образом, учителя-люди должны будут продемонстрировать свою компетентность в области эмоционального взаимодействия с учащимися, оценочных суждений об образовательной деятельности, проектирования и внедрения обучения, осуществляемого ИИ, и консультаций, основанных на взаимоотношениях. Кроме того, учителя-люди и ИИ должны будут находиться в постоянном взаимодействии.

В одном классе обучаются разные ученики с разными когнитивными, физическими и эмоциональными способностями. В такой среде учителя физкультуры должны уметь выявлять индивидуальные различия учащихся и ставить перед ними соответствующие цели. Согласно теории самоэффективности обучения [22], опыт успешных достижений создает сильные индивидуальные убеждения, в то время как опыт неудач приводит к ослаблению самоэффективности. Представление учащимся достижимых целей, чтобы они

могли получить опыт достижения положительных результатов, является важным аспектом, который следует учитывать при планировании занятий физкультурой. Однако существует множество ограничений для обеспечения успешного опыта учащихся путем точного определения индивидуальных различий и обеспечения соответствующих уровней достижений и целей для всех отдельных учащихся на уроках физкультуры. Занятия физкультурой с использованием искусственного интеллекта могут помочь преодолеть эти трудности с помощью контроля сложности. Учитывая различные характеристики и индивидуальные различия учащихся, участвующих в занятиях, контроль сложности ИИ служит для обеспечения достижимых целей и уровней задач в соответствии с уровнем учащегося. Показано, что некоторые учащиеся наслаждаются занятиями физкультурой и активно участвуют в них, в то время как другие избегают или пассивно участвуют в занятиях по разным причинам. Проблема заключается в том, что учащиеся судят о своих физических способностях и уровне активности не сами по себе, а с точки зрения и с учетом мнения учителей и других учащихся, участвующих в процессе обучения. Занятия физкультурой с использованием искусственного интеллекта позволят учащимся получить разнообразный и индивидуальный опыт. Благодаря представлению разнообразной сенсорной информации учащиеся могут получать непосредственный опыт, а получая объективную информацию и обратную связь от искусственного интеллекта, учащиеся могут объективно оценивать свои физические способности. Кроме того, учащиеся смогут активно заниматься физическими упражнениями, чтобы улучшить свои физические способности, вместо того, чтобы сравнивать себя с других учащихся.

Основываясь на основных принципах практического применения ИИ, эта работа дает представление о направлениях применения искусственного интеллекта в физкультуре. Основываясь на предыдущих работах, были исследованы только технологии, применимые к ФВ, такие как машинное обучение, глубокое обучение и NLP. Применение в ФВ других технологий (например, экспертные системы) не рассматривалось. Более глубокий анализ будет возможен при исследовании того, как можно использовать другие технологии в ФВ. Кроме того, в этом исследовании представлен общий обзор использования искусственного интеллекта в физкультуре, оставляя более подробное изучение конкретных методов применения для будущих исследований. Другими словами, каждая из этих областей: ИИ и индивидуальное обучение физкультуре, ИИ и предоставление знаний, ИИ и оценка учащихся, ИИ и консультирование учащихся и роль будущих учителей физкультуры могут стать независимыми исследованиями в будущем. Наконец, поскольку в этой работе были предложены конкретные методы использования ИИ в физкультуре, количественной проверки эффективности применения не проводилось. Следовательно, алгоритмы искусственного интеллекта могут не соответствовать результатам эмпирической проверки при применении, и их эффективность и практическое применение не могут быть сейчас окончательно показаны. Если ИИ, который может быть использован для ФВ, действительно будет разработан в будущем, эффективность и практичность ИИ могут быть проверены более объективно и научно путем сравнительных исследований ФВ с использованием и без использования ИИ.

Таким образом, физическая культура является важной частью всестороннего человеческого развития. Использование современных интеллектуальных технологий в физкультуре теоретически может обогатить содержание образования, способствовать современному восприятию физкультуры и изменениям в традиционных образовательных моделях, а также иметь глубокие практические последствия, реструктурируя физкультуру и способствуя непрерывному развитию. Наряду с характером образовательной модели, визуализацией и повторением, физкультура будет иметь более высокий уровень благодаря применению искусственного интеллекта в спорте.

Чтобы получить точное представление об ИИ, сначала необходимо было рассмотреть возможности и проблемы, которые технологии приносят в физическую

культуру, а также динамичную роль научно-технических инноваций. Искусственный интеллект, применяемый в системе со своим окружением, способствует творческому мышлению и способностям человека, что более ярко отражает его ценность. Применение интеллектуальных технологий, несомненно, окажет влияние на развитие современного образования.

Есть три основные причины, по которым искусственный интеллект необходим для ФВ. Во-первых, физкультура больше не происходит просто на спортивной площадке. По мере развития современных технологий, как дополненная, виртуальная реальность и Интернет-вещей, прежние ограничения в ФВ были сняты. Теперь ученики смогут посещать занятия по физкультуре, если они хотят, несмотря на возможные физические ограничения. Во-вторых, индивидуальное обучение и воспитание должны быть реализованы для повышения успеваемости учащихся. Искусственный интеллект очень эффективно определяет спортивные способности каждого ученика, собирает данные и дает обратную связь в режиме реального времени для получения оптимальных результатов. В-третьих, искусственный интеллект предоставляет различные инструменты обучения для стимулирования интереса учеников и поддержания их мотивации к обучению. Таким образом, необходимо разрабатывать и внедрять технологии искусственного интеллекта таким образом, чтобы и учащиеся, и преподаватели были удовлетворены полученными улучшениями в обучении.

ФВ на основе ИИ складывается из усилий ученика, преподавателя и их совместной образовательной работы. ИИ помогает учащимся получать знания, анализировать их и визуализировать, позволяя им тратить больше времени на физическую активность, практический и виртуальный опыт, а также на взаимодействие между преподавателями и учащимися. Искусственный интеллект поддерживает принятие решений преподавателями, сообщая преподавателям о состоянии класса в режиме реального времени и представляя различные альтернативы решения проблем учащихся. Также он эффективно помогает преподавателям в оценке и управлении обучением. Наконец, ИИ помогает учителям сокращать время, затрачиваемое на административную работу, предоставляя больше времени на повышение качества преподавания.

Образование в области информационных услуг позволяет учителям физкультуры выбирать образовательные технологии, основанные на мультимедиа и сетевых коммуникациях, и создавать оптимизированные физические упражнения, активно разрабатывая и применяя информационные ресурсы. В среде информационных технологий учителям физкультуры нужны не только современные технологии, но и новые концепции и теории, чтобы пересмотреть свои методы обучения во всех аспектах.

Использование технологий в современных классах физической культуры является ключом к достижению модернизации в области спортивного образования. Таким образом, изменения в отношении знаний, талантов, образования, взглядов учителей физкультуры на учащихся, концепций исследований, концепций оценки учащихся, а также философии образования способствуют развитию высококачественных и инновационных спортивных талантов в информационную эпоху.

Кроме того, в информационную эпоху способность учителей физкультуры использовать образовательные технологии должна соответствовать общему уровню знаний, методов, применения и оценки теории образовательных технологий. Это включает в себя базовые знания и навыки в области спортивных образовательных технологий, способность решать проблемы, возникающие при их использовании, отношение признания к спортивным образовательным технологиям, социальную ответственность и т.д. Таким образом, технология интеллектуального физического воспитания будет являться прорывом в области физической культуры. Создание новой концепции физкультуры, инновации и реформы, происходящие в системе спортивного образования, не могут быть объяснены отдельно от технического обеспечения физического воспитания. Таким образом, все, кто работает в области физической

культуры, включая преподавателей, обучающихся, администраторов и спортивных технических экспертов, должны иметь возможность использовать современные инженерные достижения для дальнейшего продвижения инноваций в области физической культуры.

### **Заключение**

Технологии искусственного интеллекта и технологии спортивного образования быстро развиваются. Многие исследователи и преподаватели участвуют в исследованиях современных образовательных технологий, и многочисленные исследования продолжают проводиться в рамках различных дисциплин и с использованием различных научных теорий. Основываясь на практическом и техническом понимании образования, эксперты во всех областях участвуют в образовательной и исследовательской деятельности, рассматривая новые технологии для своих областей обучения. Однако отсутствие академического обмена или связи между этими областями исследований снижает эффективность исследований. Особенно в области технологий физического воспитания отсутствует сравнение с результатами других дисциплин. Таким образом, спортивные работники и менеджеры должны проводить практические исследования в области физической культуры и объединять свои исследовательские навыки для создания новых задач и возможностей. Кроме того, необходимо создать интегрированную исследовательскую группу, создать здоровую среду для развития современных технологий физического воспитания и разработать общие приложения, связанные с ИИ, которые могли бы способствовать всестороннему развитию инноваций в области спортивного образования.

Основываясь на концепции ИИ и его разновидностях, в этой работе рассматривались перспективы его использования в физкультуре. Кроме того, наше исследование было сосредоточено на анализе областей, в которых ИИ может быть применен в контексте спортивных образовательных технологий, индивидуальных занятий физкультурой, предоставления знаний с использованием ИИ, оценки учащихся, методов консультирования учащихся, а также роли будущих учителей физкультуры. Однако анализ этих областей дал лишь общее представление о том, в каком направлении должно осуществляться внедрение ИИ в каждой области, а конкретный метод использования не был полностью объяснен. Поэтому в будущем мы планируем провести более подробные, практические и углубленные исследования в каждой области.

Использование ИИ в ФВ, представленное в этой работе, рассматривало только некоторые технологии ИИ, которые могут быть использованы в ФВ, и поэтому необходимо разрабатывать методы ФВ с использованием технологий ИИ, не освещенные в этом исследовании (например, поисковые системы, эволюционные вычисления и др.). Кроме того, поскольку в этом исследовании были представлены конкретные методы применения искусственного интеллекта, но для каждого приложения не было проведено процедуры количественной проверки. Поэтому необходимо исследовать, согласуются ли результаты применения искусственного интеллекта с результатами эмпирической проверки при практическом применении. Например, после разработки ИИ, применимого к ФВ, необходимы экспериментальные исследования для проведения количественных сравнений и проверки посредством сравнения с традиционным ФВ, в котором не используется ИИ.

### **Литература**

1. <https://artificialintelligence-news.com/2018/05/24/why-augmented-intelligence-is-a-better-way-to-describe-ai/> (дата обращения: 17.11.2021)
2. Нопин, С. В. Искусственный интеллект и информационные системы в спорте (анализ инновационных исследований зарубежных лабораторий за 2010– 2016 гг.) / С. В. Нопин, Ю. В. Корягина // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта. – 2016. – № 9(139). – С. 118– 123.

3. A. McCabe and J. Trevathan, "Artificial Intelligence in Sports Prediction," Fifth International Conference on Information Technology: New Generations (itng 2008), 2008, pp. 1194–1197, doi: 10.1109/ITNG.2008.203.
4. Russell, Stuart J. ; Norvig, Peter: Artificial Intelligence: A Modern Approach (2nd Edition) : {Prentice Hall}, 2002. – ISBN 0137903952
5. Roads, C. Review of *Principles of Artificial Intelligence*, by N. Nilsson // *Computer Music Journal*. – 4(3).– 1980. – 64–65. <https://doi.org/10.2307/3679642>
6. Roll, I., Wylie, R. Evolution and Revolution in Artificial Intelligence in Education. *Int J Artif Intell Educ* 26, 582–599 (2016). <https://doi.org/10.1007/s40593-016-0110-3>
7. Шолле Ф. Глубокое обучение на Python. – СПб.: Питер, 2018.
8. Верзунов, С. Н. Сравнение глубоких нейронных сетей на основе различных предварительно обученных CNN для диагностики COVID-19 по рентгеновским снимкам / С. Н. Верзунов, Х. А. Раимжанов // Проблемы автоматизации и управления. – 2021. – № 1(40). – С. 12–25.
9. Ghahramani, Z. Probabilistic machine learning and artificial intelligence. *Nature* 521, 452–459 (2015). <https://doi.org/10.1038/nature14541>
10. Jordan MI, Mitchell TM. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*. 2015 Jul 17;349(6245):255-60. doi: 10.1126/science.aaa8415. PMID: 26185243.
11. Chowdhary, K.R. Natural Language Processing. In *Fundamentals of Artificial Intelligence*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020.
12. LeCun, Y., Bengio, Y. & Hinton, G. Deep learning. *Nature* 521, 436–444 (2015). <https://doi.org/10.1038/nature14539>
13. Экспертные системы : учебное пособие / Сост. А. Н. Никулин. – Ульяновск : УЛГТУ, 2015. – 78 с.
14. Lee, H.S.; Jin, Y.K. A Review of Benefits and Trends for the Three Specific and Distinct Products Using Technology in Physical Education. *J. Korean Assoc. Phys. Educ. Sport Girls Women* 2016, 30, 275.
15. Aroyo, L.; Dolog, P.; Houben, G.J.; Kravcik, M.; Naeve, A.; Nilsson, M.; Wild, F. Interoperability in Personalized Adaptive Learning. *J. Educ. Technol. Soc.* 2006, 9, 4–18.
16. Lee, H.-S.; Lee, J.-H. The Effect of T-Ball Class on Physical Self-Efficacy of Elementary School Students Using Virtual Reality Technology(VR). *Korean J. Sports Sci.* 2020, 29, 613–624.
17. Silva, A.J.; Costa, A.M.; Oliveira, P.M.; Reis, V.M.; Saavedra, J.; Perl, J.; Rouboa, A.; Marinho, D.A. The Use of Neural Network Technology to Model Swimming Performance. *J. Sports Sci. Med.* 2007, 6, 117–125.
18. Baca, A.; Kornfeind, P. Stability analysis of motion patterns in biathlon shooting. *Hum. Mov. Sci.* 2012, 31, 295–302.
19. Yang, S. The Possibility of Machine Learning Algorithms for Seon Encounter Dialogues in the ‘Chatbot’ Development. *J. Korean Assoc. Buddh. Stud.* 2017, 84, 39–70.
20. Gulherme, A. AI and Education: The importance of teacher and student relationship. *AI Soc.* 2017, 32, 1–8.
21. Koedinger, K. R., Brunskill, E., Baker, R. S., McLaughlin, E. A., & Stamper, J. (2013). New Potentials for Data-Driven Intelligent Tutoring System Development and Optimization. *AI Magazine*, 34(3), 27-41. <https://doi.org/10.1609/aimag.v34i3.2484>
22. Bandura, A. Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change. *Psychol. Rev.* 1977, 84, 191.

**ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ**

Научно-технический журнал

Литературный редактор Е.В. Комарова

Компьютерная верстка А.У. Касимова

Подписано к печати 28.03.2022 г. Формат 84/108 1/16

Печать офсетная. Объем 16.25 усл. п.л. Тираж 200 экз.

Издательство «ИМА»

720071, Бишкек, проспект Чуй, 265