

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

# **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

**№ 4**

**Нижний Новгород 2024**

УДК 621.3

ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2024. № 4 (28). – 119 с.

*Выходит 1 раз в квартал*

*Журнал включен ВАК при Минобрнауки России в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по специальностям 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки), 2.4.3. Электроэнергетика (технические науки)*

**Главный редактор**

**Алексей Борисович Лоскутов, д-р техн. наук, профессор**

**зам. гл. редактора**

Андрей Борисович Дарьенков д-р техн. наук, доцент

Елена Николаевна Соснина д-р техн. наук, профессор

**отв. секретарь**

Андрей Владимирович Шалухо канд. техн. наук

**отв. редактор**

Валерия Игоревна Казакова канд. филос. наук, доцент

**выпускающий редактор**

Иван Алексеевич Липужин канд. техн. наук

**ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:**

Даурен Садыкович Ахметбаев

д-р техн. наук (Казахстан)

Геннадий Яковлевич Вагин

д-р техн. наук, профессор

Леонид Абрамович Герман

д-р техн. наук, профессор

Валерий Геннадьевич Гольдштейн

д-р техн. наук, профессор

Игорь Васильевич Гуляев

д-р техн. наук, профессор

Павел Владимирович Илюшин

д-р техн. наук

Александр Леонидович Куликов

д-р техн. наук, профессор

Виктор Николаевич Мешеряков

д-р техн. наук, профессор

Александр Сергеевич Плехов

канд. техн. наук, доцент

Александр Юрьевич Смирнов

д-р техн. наук, доцент

Владимир Георгиевич Титов

д-р техн. наук, профессор

Олег Станиславович Хватов

д-р техн. наук, профессор

Юрий Иванович Хохлов

д-р техн. наук, профессор

Александр Иванович Чивенков

д-р техн. наук, профессор

**Учредитель и издатель:**

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева»

(603155, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

Электронная версия журнала:  
<https://ie.ntnu.ru>

СМИ зарегистрировано Роскомнадзором  
ПИ № ФС77-81688 от 06 августа 2021 г.

ISSN 2658-6754

УДК 621.3

© Нижегородский государственный технический  
университет им. Р.Е. Алексеева, 2024

**СОДЕРЖАНИЕ**

<b>ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ .....</b>	<b>4</b>
<b>Смирнов А.Ю., Ульянов Д.А., Стасюк П.Г., Уснунц-Кригер Т.Н.</b> Проектирование индукторных двигателей для привода механизмов аварийной защиты ядерных реакторов .....	<b>4</b>
<b>Платонов Д.Ю., Кротков Е.А., Степанов В.П.</b> Моделирование расчетной электрической нагрузки погрузочного крана морского порта .....	<b>21</b>
<b>Рыжова Е.Л., Осипов В.Ю.</b> Техническая диагностика выпрямительного инверторного преобразователя в режиме рекуперативного торможения при использовании элетропневматических тормозов электроподвижного состава .....	<b>31</b>
<b>Старостина Я.К., Токарев А.Д., Поснов Д.Д.</b> Использование нейросетевых регуляторов в автоматизированных системах управления электроприводом .....	<b>47</b>
<b>Белошистов А.И., Серов А.Л., Белошистов А.А.</b> Микропроцессорное устройство защиты от токов утечки в цепях напряжением 36(42) В	<b>58</b>
<b>Петленко Д.Б., Авдонин Е.А.</b> Применение квантовых магнитометров в магниторазведке с использованием беспилотных систем .....	<b>71</b>
<b>ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА .....</b>	<b>86</b>
<b>Ковалев Д.И., Вариводов В.Н., Голубев Д.В., Елфимов С.А., Жуликов С.С.</b> Оптимизационный расчет электрофизических параметров распределительных устройств с полимерно-газовой изоляцией .....	<b>86</b>
<b>Лысов Н.Ю., Клубков А.В., Нестеренко А.А., Акинин Н.А.</b> Применение композиционных материалов в высоковольтных электро-технологических установках на основе барьерного разряда .....	<b>100</b>
<b>ХРОНИКА .....</b>	<b>114</b>
Степанову Валентину Павловичу 80 лет .....	<b>114</b>

---

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

---

УДК 62-83:621.313:621.039

EDN УТАНАЕ

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНДУКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
ДЛЯ ПРИВОДА МЕХАНИЗМОВ АВАРИЙНОЙ  
ЗАЩИТЫ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ****А.Ю. Смирнов**

ORCID: 0000-0002-2391-0942 e-mail: a\_yu\_smirnov@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова  
*Нижний Новгород, Россия***Д.А. Ульянов**

ORCID: 0000-0002-3328-8675 e-mail: danil15ulyanov@gmail.com

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***П.Г. Стасюк**

ORCID: 0009-0009-6353-920X e-mail: work.el.nn@yandex.ru

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова  
*Нижний Новгород, Россия***Т.Н. Уснунц-Кригер**

ORCID: 0009-0003-1789-8769 e-mail: usnuntskriger@mail.ru

Выксунский филиал НИТУ «МИСиС»  
*Выкса, Россия*

Сопоставлены возможные конструкции бесконтактных двигателей в приводе для перемещения в верхнее положение стержней аварийной защиты ядерного реактора. Индукторные двигатели с электромагнитным возбуждением обеспечивают наибольшую отдачу по моменту при кратковременном увеличении (форсировке) тока. Рассмотрены особенности проектирования индукторных двигателей с электромагнитным возбуждением со стороны статора для кратковременного режима работы. Во избежание глубокого насыщения магнитной цепи, приводящего к непродуктивному возрастанию потребляемой мощности и дополнительному нагреву, предлагается сначала сформировать геометрию магнитной цепи статора в положении ротора, при котором потокоцепление фазы принимает максимальное значение,

затем рассчитывать характеристику намагничивания ферромагнитных участков магнитной цепи. Выбор значения рабочего магнитного потока вблизи за участком насыщения этой характеристики позволяет однозначно определить размер зазора между статором и ротором двигателя и его моментные и энергетические характеристики. Методика распространяется на индукторные двигатели с электромагнитным возбуждением, где требуется кратно форсировать вращающий электромагнитный момент за счет весьма кратковременного режима работы.

**Ключевые слова:** индукторный двигатель, привод аварийной защиты (ядерного реактора), ротор, синхронный привод, статор, электромагнитное возбуждение, электромагнитные нагрузки.

**Для цитирования:** Смирнов А.Ю., Ульянов Д.А., Стасюк П.Г., Уснунц-Кригер Т.Н. Проектирование индукторных двигателей для привода механизмов аварийной защиты ядерных реакторов // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 4. С. 4-20. EDN YTAHAE

## DESIGN OF INDUCTOR MOTORS FOR DRIVING EMERGENCY PROTECTION MECHANISMS OF NUCLEAR REACTORS

**A.Yu. Smirnov**

ORCID: 0000-0002-2391-0942 e-mail: a\_yu\_smirnov@mail.ru  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
JSC «Afrikantov OKBM»  
Nizhny Novgorod, Russia

**D.A. Ulyanov**

ORCID: 0000-0002-3328-8675 e-mail: danil15ulyanov@gmail.com  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia

**P.G. Stasyuk**

ORCID: 0009-0009-6353-920X e-mail: work.el.nn@yandex.ru  
JSC «Afrikantov OKBM»  
Nizhny Novgorod, Russia

**T.N. Usnunts-Kriger**

ORCID: 0009-0003-1789-8769 e-mail: usnuntskriger@mail.ru  
Vyksa Branch of the National University of Science and Technology «MISiS»  
Vyksa, Russia

**Abstract.** The paper presents the design of brushless motors for driving emergency protection mechanism of nuclear reactor. Inductor synchronous motors with electromagnetic excitation provide the highest torque reaction with a short-term increase (forcing) of current. Design features of short duration operation of the inductor motors with electromagnetic excitation from stator are considered. A design methodology is proposed to avoid a magnetic circuit deep saturation, which leads to an unproductive increase in power losses and additional heating. First, the geometry of the stator magnetic circuit is formed in the rotor position at which the phase flux linkage takes on its maximum value, then the magnetization curve of the ferromagnetic sections of the magnetic circuit is calculated. The choice of the working magnetic flux point near the saturation section allows to determine the size of the air gap between the stator and the rotor of the motor, and its torque and energy characteristics. Methodology applicable to inductor motors with electromagnetic excitation, where it is necessary to repeatedly increase the rotating torque due to a very short-term operating mode.

**Keywords:** inductor motor, emergency drive (of nuclear reactor), rotor, synchronous drive, stator, electromagnetic excitation, electromagnetic loads.

**For citation:** A.Yu. Smirnov, D.A. Ulyanov, P.G. Stasyuk and T.N. Usnunts-Kriger, "Design of inductor motors for driving emergency protection mechanisms of nuclear reactors", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 4-20, 2024. EDN YTAHAЕ

## I. Введение

Важнейшей сферой применения индукторных двигателей являются электроприводы систем управления и защиты ядерных энергетических установок, где они используются в качестве шаговых двигателей в механизмах регулирования и компенсации реактивности [1], также возможно применение этих двигателей в приводах аварийной защиты (АЗ) (рис. 1).

Принцип действия большинства приводов АЗ основан на преобразовании энергии автономных источников, не использующих энергию основной сети электроснабжения. В качестве таковых могут быть применены устройства пассивной безопасности, аккумулирующие потенциальную энергию сжатой пружины или энергию силы веса стержня-поглотителя, внедряемого в активную зону реактора: [2] – нормирующий документ; [3, 4] – конструкция и описание работы. Для приведения их в действие используются отдельные двигатели, входящие в состав привода АЗ. При поступлении сигнала аварийной защиты электромагнит обесточивается, обеспечивая перемещение рейки со стержнем-поглотителем вниз под действием своего веса.

В отличие от осуществляющих непрерывное перемещение и позиционирование регулирующих органов (РО) в промежуточных положениях двигателей привода регулирующих стержней и компенсирующих групп,

двигатели для привода АЗ в обычном режиме находятся в обесточенном состоянии. За время жизненного цикла реактора они эксплуатируются (включаются) ограниченное количество раз. Вместе с тем, в течение каждого запуска двигатель привода АЗ должен быть способен не только заранее передать энергию устройствам пассивной безопасности, но и обеспечить быстрое принудительное перемещение РО в положение останова, в крайне нежелательном случае, если по каким-либо причинам это положение в течение заданного промежутка времени достигнуто не будет.

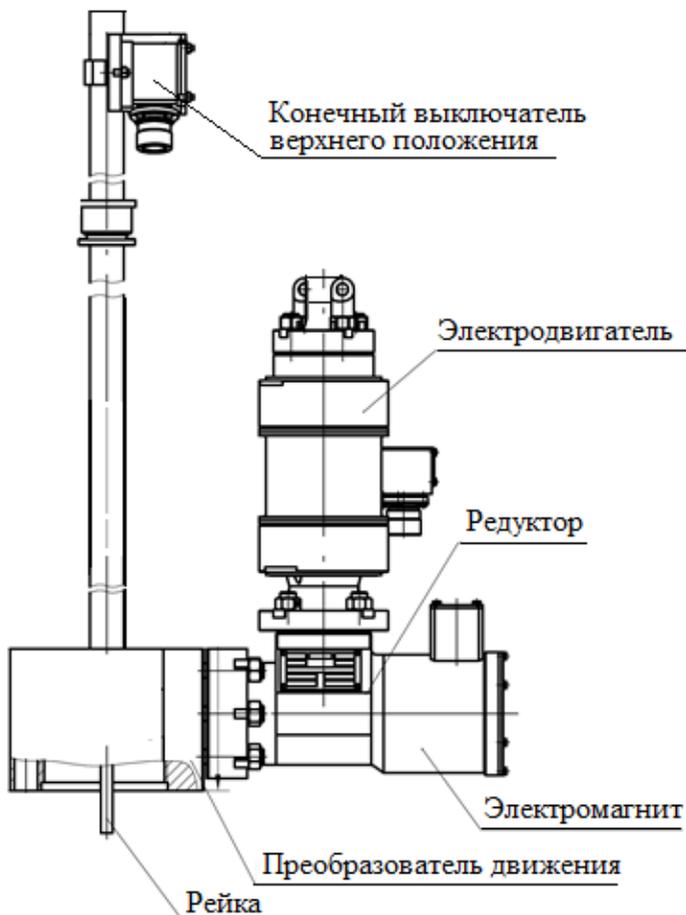


Рис. 1. Конструктивная схема привода АЗ

Fig. 1. Design diagram of the emergency protection drive

Учитывая изложенные требования, отличительными особенностями работы двигателей в приводах АЗ ядерных энергетических установок являются:

- весьма кратковременный режим работы с продолжительным нахождением в обесточенном состоянии;
- очень высокая перегрузочная способность по моменту;
- высокая отдача по моменту в ответ на увеличение тока;
- предельная надежность.

В силу последних двух факторов нецелесообразно использовать машины с постоянными магнитами. Характеристики постоянных магнитов подвержены фактору старения в условиях многолетней эксплуатации, а воздействие тепловых полей является основной причиной размагничивания. В то же время, при всех достоинствах машин с высококоэрцитивными постоянными магнитами на основе самария и неодима, обладающих самыми высокими удельными моментными характеристиками, они не позволяют существенно поднять момент в случае эксплуатационной необходимости в силу низкой удельной магнитной проводимости указанных материалов.

Высокая перегрузочная способность по моменту, очевидно, обеспечивается проектированием в больших габаритах, чем это требуется только в номинальных режимах, причем для кратковременного режима электромагнитные и тепловые нагрузки, принимаемые и допускаемые при проектировании, могут быть повышены, обеспечивая снижение габаритов и массы двигателя и привода. Ограничивающим фактором здесь является насыщение, а не плотность тока в обмотках. Иначе говоря, сечение двигателя для работы с большим запасом по моменту в кратковременном режиме работы должно быть значительно более «железным», чем «медным». В связи с этим, можно отметить преимущество бесконтактного синхронного (индукторного) двигателя с электромагнитным возбуждением перед асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Последние получили применение в приводах АЗ и эксплуатируются достаточно продолжительное время. Однако параметры асинхронных двигателей при ограничении сечения стержней не позволяют передать приемлемый момент без смещения его максимума в область нулевых и отрицательных частот вращения ротора, по механической характеристике.

Итак, наиболее перспективным вариантом двигателя для привода механизма АЗ ядерных энергетических установок является индукторная машина с электромагнитным возбуждением, с минимальным количеством электрических контуров, для повышения надежности. Известны индукторные двигатели, возбуждение и силовое питание которых осуществляется от единственной многофазной обмотки, как в разноименно-полносном, так и в

одноименно-полюсном исполнении: [5] – классификация, [6] – проектирование, [7] – анализ. В первых поток замыкается исключительно в плоскости поперечного сечения машины, в радиально-тангенциальном направлении. Во вторых поток замыкается в радиально-осевом направлении. Анализ распределения потока в обеих машинах при работе с форсированными токами показывает преимущество первых, так как замыкание потока в осевом направлении неизбежно создает участки глубокого насыщения в роторе одноименно-полюсной машины, ограничивающие ее рабочий магнитный поток и удельный вращающий момент.

Таким образом, для кратковременного режима работы в составе привода АЗ обосновано применение разноименно-полюсного индукторного двигателя с единственной многофазной обмоткой на явно выраженных полюсах-зубцах статора [5-7]. Его возбуждение осуществляется обтеканием фаз нереверсивным (выпрямленным) током, от преобразователя, собранного, например, по схеме асимметричного моста [8]. Достоинством схемы являются простота, надежность, широкие возможности для регулирования тока.

## II. Методика проектирования

Для машины, работающей в кратковременном режиме, любые ограничения по габаритным размерам учитываются изменением (увеличением) линейной токовой нагрузки и плотности тока в весьма широких пределах, допустимых по условиям нагрева. При этом важно, чтобы повышенные электромагнитные нагрузки были продуктивными, т.е. не приводили бы к слишком глубокому насыщению, вызывающему чрезмерный рост потерь и ограничивающему удельные моментные характеристики. В аналогичных методиках проектирования [6-7] этот ограничивающий фактор не учитывается.

Поэтому в известном фундаментальном равенстве, представляющем собой баланс механических и электромагнитных нагрузок двигателя [5, 9, 10]:

$$\frac{D^2 \lambda}{M} = \frac{1}{K_1 B_8 A_1}, \quad (1)$$

уровень средней индукции в зазоре  $B_8$  завышен быть не может и предварительно выбирается из хорошо известных в практике электромашиностроения пределов, тогда как линейная токовая нагрузка  $A_1$  подлежит определению, с целью достижения приемлемых базовых размеров: диаметра ротора  $D$  и осевой длины пакета  $L$  при потребном электромагнитном моменте  $M_z$ . В разомкнутом (шаговом) приводе диаметр  $D$  может быть выбран,

исходя из условия получения оптимального соотношения моментов инерции ротора двигателя и подвижных частей привода в диапазоне от 2:1 до 1:1 [11].

При выбранном уровне линейной токовой нагрузки наружный диаметр статора двигателя является функцией плотности тока. Здесь  $K_1$  – конструктивный коэффициент, определяемый формой кривой индукции в зазоре, коэффициентом полюсного перекрытия и обмоточным коэффициентом каждой из машин. Также могут существовать ограничения на габаритные размеры двигателя, преодолеть которые возможно исключительно за счет дальнейшего увеличения плотности тока в обмотке для формирования компактного ее сечения.

Для исключения формирования участков локального насыщения (при изготовлении всего пакета статора из одного и того же материала) ширину зубцов статора  $b_{zc}$ , а также и зубцов ротора  $b_{zp}$ , следует принять равной ширине полюсных наконечников  $b_{пн}$ . Она определяется коэффициентом полюсного перекрытия, так, что:

$$b_{zc} = b_{пн} = \frac{\alpha_\delta \pi D}{Z_1}, \quad (2)$$

где  $\alpha_\delta$  – коэффициент полюсного перекрытия, принимаемый в пределах  $\alpha_\delta = 0,45-0,49$  длины зубцового деления статора  $\tau$  вдоль окружности зазора.

Число зубцов на статоре  $Z_1$  определяется концептуальной схемой привода и машины, числом ее фаз, количеством устойчивых положений ротора на оборот при импульсном питании, некоторыми другими техническими требованиями, но чаще всего оно равно удвоенному числу фаз, так что полюса с катушками одной фазы занимают диаметрально противоположные фазные зоны.

При известной ширине зубцов можно однозначно рассчитать кривую намагничивания ферромагнитных участков магнитной цепи статора (на один зубец) и выбрать на ней точку наибольшей индукции  $B_{Fe\_max}$ , соответствующую максимальной проводимости воздушного зазора. При этом, во избежание непродуктивного нагрева обмоток при форсировании тока, в качестве максимальной индукции  $B_{Fe\_max}$  целесообразно выбрать значение, при котором амплитуда магнитного потока не более, чем на 5-10 % превышает поток, соответствующий индукции насыщения, за «коленом» общей кривой намагничивания [12]. Для большинства магнитомягких материалов подходит значение в пределах  $B_{Fe\_max}=1,1-1,2$  Тл.

Магнитодвижущая сила (МДС) катушек, которая зависит от назначенной линейной токовой нагрузки  $A_1$ ,

$$F_k = \frac{A_1 \cdot \pi D}{Z_1}, \quad (3)$$

является квадратичной функцией или линейной функцией высоты зубцов, в случае прямоугольной формы сечения катушек. При известном диаметре расточки высота зубцов и пазов составит:

$$h_z = h_n = \frac{2A_1}{\pi D(1 - \alpha_\delta)k_{\text{зап.}j}} + h_{\text{пн}}, \quad (4)$$

где  $h_{\text{пн}}$  – высота (радиальный размер) полюсного наконечника,  $k_{\text{зап}}$  – коэффициент заполнения обмоточного пространства медью проводов.

С учетом пазового рассеяния, учитываемого соответствующей проводимостью  $\Lambda_{\text{сп}}$ , которая однозначно определяется по известной из (2)-(4) геометрии пазов, значения индукции указанных участков связываются между собой через уравнение, записанное по первому закону Кирхгофа для узла на поверхности полюсного наконечника, в функции удельного, на единицу осевой длины машины, магнитного потока:

$$B_\delta b_z \lambda D = B_{Fe\_max} b_{zc} \lambda D - \Lambda_{\text{сп}} F_k, \quad (5)$$

здесь  $\Lambda_{\text{сп}}$  – удельная, на единицу осевой длины, проводимость пазового рассеяния является функцией средней ширины паза статора:

$$\Lambda_{\text{сп}} = \mu_0 \frac{Z_1 h_n}{\pi(D + h_n) - Z_1 b_{zc}}. \quad (6)$$

После сравнения с первоначально принятым значением и его корректировки при необходимости, вычисляются магнитная проводимость зазора между статором и ротором и его размер в радиальном направлении.

Пренебрегая падением магнитного напряжения в роторе или введя для его учета небольшой поправочный коэффициент, можно вычислить наибольшую магнитную проводимость воздушного зазора, которая должна иметь место при совпадении осей явно выраженных полюсов фазы обмотки и зубцов ротора:

$$\Lambda_{\delta\_max} = \frac{\pi D^2 \lambda \alpha_\delta B_{Fe\_max}}{A_1}. \quad (7)$$

Приравнивая ее величину к очевидному значению:

$$\Lambda_{\delta_{\max}} = \frac{\mu_0 \pi D^2 \lambda \alpha_{\delta}}{\delta}, \quad (8)$$

можно определить величину зазора  $\delta$ , при которой и индукция в зазоре  $B_{\delta}$ , и максимальная индукция в магнитопроводе  $B_{Fe\_max}$  принимают ранее выбранные предварительные значения.

Исходя из электрических потерь, массы обмоточных проводов и теплостойкости меди, можно дать предварительную оценку времени, в течение которого двигатель должен переместить РО в рабочее положение механизма АЗ, до недопустимого перегрева изоляции проводов, в предположении, что процесс тепловыделения является равномерным во времени:

$$t = \frac{(T_{из} - T_0)C}{mP_M}, \quad (9)$$

где  $T_{из}$  – класс нагревостойкости изоляции применяемого обмоточного провода по ГОСТ 8865-93 (или МЭК 85-84),  $m$  – число фаз обмотки двигателя,  $P_M$  – потери в меди одной фазы обмотки.

### III. Имитационное моделирование

Для такого чрезвычайно ответственного механизма, как привод аварийной защиты ядерного реактора, его работоспособность должна быть проверена с использованием методов численного моделирования. В модели привода двигатель представлен сеточной моделью (рис. 2), сгенерированной в среде *ANSYS/Emag* с использованием встроенного пакета *APDL*. По ней на каждом шаге интегрирования уравнения движения привода вычисляется электромагнитный момент двигателя  $M_{\Sigma}$ . Он является периодической функцией тока и углового положения ротора.

Электромеханическая часть привода состоит из четырехфазного двигателя (рис. 3, а) и инвертора, собранного по схеме асимметричного моста (рис. 3, б). Каждая фаза двигателя образована двумя катушками, расположенными на одной паре диаметрально противоположных полюсов, и подключена к отдельному инвертору. Достоинства инвертора, собранного по схеме асимметричного моста (рис. 3, б) – простота и надежность, широкие возможности для регулировки выходного тока, помехозащищенность. В блоке управления БУ сигнал датчика тока на каждом цикле опроса сравнивается с требуемым значением, в зависимости от результатов сравнения формируется длительность включенного состояния транзисторов *VT1* и

$VT2$ , которые открываются и закрываются синфазно. Для исключения выбега, влекущего за собой повышенные динамические нагрузки механизма, привод выполнен разомкнутым, без управления по углу поворота ротора, где индукторный двигатель используется в качестве шагового, обеспечивающего строго дозированное дискретное перемещение ротора в соответствии с поданным количеством импульсов тока.

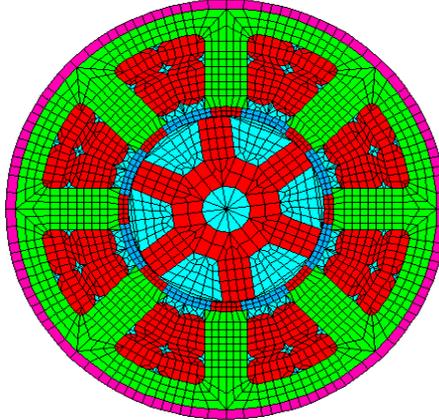


Рис. 2. Сеточная модель индукторного двигателя

Fig. 2. Grid model of an inductor motor

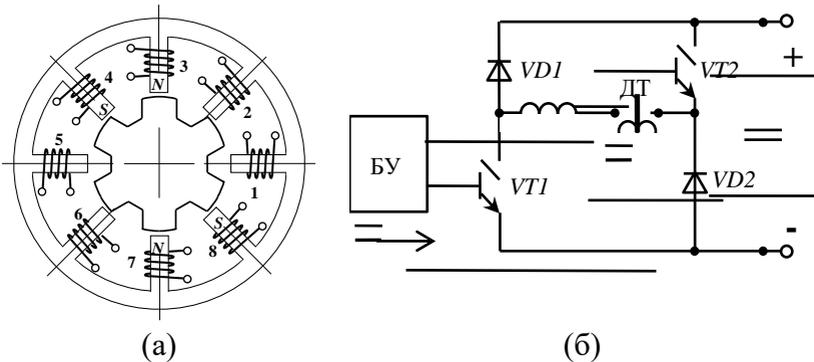


Рис. 3. Схема расположения катушек четырехфазного индукторного двигателя (а) и подключение его фаз к инвертору, собранному по схеме асимметричного моста, по одному в каждую фазу (б)

Fig. 3. Four phases inductor motor's coil's displacement scheme (a) and inductor motor connection to asymmetrical bridge inverter, by one at every phase (b)

Данная структура привода получила применение, прежде всего, в механизмах привода регулирующих и компенсирующих групп. При этом подбор формы импульса тока близкой к треугольной («выпуклый» треугольник) обеспечивает практически равномерное движение регулирующего органа не только в установившихся режимах, но и при пуске и останове, реализуемых путем изменения частоты следования управляющих импульсов тока, вплоть до полного ее обнуления в режиме удержания регулирующего органа в неподвижном состоянии. Благодаря минимизации динамических нагрузок и стрессов в механических передачах, данная система разомкнутого привода показала высокую эксплуатационную надежность на объектах ядерной энергетики, обеспечивая наработку весьма длительного ресурса непрерывной работы. Схема привода является традиционной, проверенной годами эксплуатации на объектах. Новизной обладает исключительно двигатель, спроектированный по изложенной последовательности, геометрические соотношения которого позволяют осуществлять значительную форсировку момента за счет многократного увеличения тока при кратковременном включении.

Электромагнитный момент двигателя воспринимает механическую нагрузку, которая содержит три составляющих: потенциальную от веса РО,  $M_G$ ; трения,  $M_{тр}$ , являющуюся ступенчатой функцией направления движения; и упругой деформации пружины  $M_{упр}$ . Дисбаланс электромагнитного момента и составляющих нагрузки уравнивается динамической нагрузкой, пропорциональной угловому ускорению:

$$J\ddot{\theta} = M_s - M_G - M_{тр} \operatorname{sign}(\dot{\theta}) - M_{упр}(x), \quad (10)$$

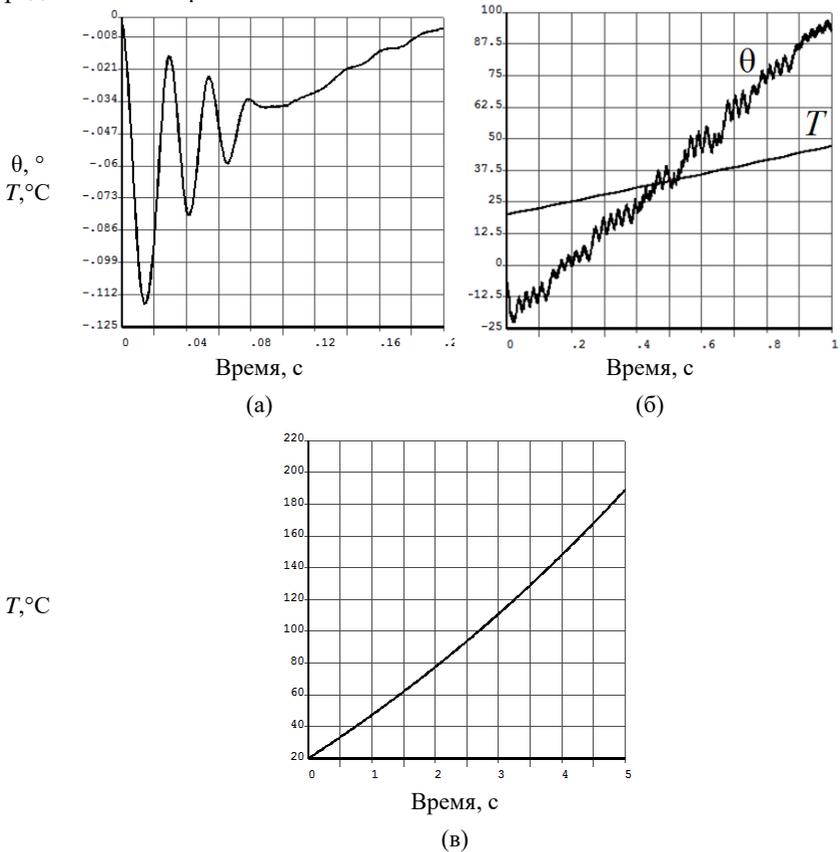
где  $J$  – суммарный момент двигателя и подвижных частей привода на его валу.

Последняя составляющая нагрузки, так же, как и от трения в механизме, является нелинейной, поскольку действует только на начальном участке подъема РО, когда его положение  $X$  по высоте не превышает длину хода тормозящей пружины  $l_{пр}$  ( $X < l_{пр}$ ),

$$M_{упр}(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x \geq l_{пр} \\ kx, & \text{при } x \leq l_{пр} \end{cases}, \quad (11)$$

где  $k$  – конструктивная постоянная, определяемая параметрами преобразователя вращательного движения в поступательное (узел 4 на рис. 1).

Осциллограммы движения ротора и изменения температуры, полученные при интегрировании (10) с учетом (11) и сеточной модели двигателя, представлены на рис 4.



**Рис. 4. Осциллограммы при пуске привода: угла поворота ротора  $\theta$  (а), угла поворота  $\theta$  и температуры двигателя  $T$  (б) и температуры двигателя  $T$  (в)**

**Fig. 4. Oscillograms during drive start-up: rotor rotation angle  $\theta$  (а), rotation angle  $\theta$  and engine temperature  $T$  (б) and engine temperature  $T$  (в)**

При неблагоприятных начальных условиях пуска по углу ротор первоначально получает отрицательный импульс в сторону падения РО (рис. 4, а), действие которого затем нейтрализуется в результате переходных колебаний. На более длительном временном промежутке (рис. 4, б) прослеживается линейное нарастание температуры и угла, с небольшими, благодаря

треугольной форме импульсов тока, возмущениями, отслеживающими колебания ротора вокруг синхронной скорости. На более длительном интервале проявляется ускоренное нарастание температуры обмотки, вследствие роста электрической потерь под влиянием увеличивающегося сопротивления меди проводов (рис. 4, в). Завершить процесс интенсивного нарастания температуры возможно только по достижении регулирующим органом конечного положения, отключением двигателя после срабатывания стопорного устройства или подачи питания на удерживающий электромагнит. Движение с максимальной скоростью, близкой к частоте приемистости двигателя, позволяет облегчить тепловой режим, сделать его наиболее благоприятным по нагреву и ресурсу изоляции.

Частота приемистости, вблизи до которой двигатель обеспечивает перемещение РО в составе разомкнутого (шагового) привода с наибольшей скоростью, определяется параметрами двигателя и привода [6, 8, 13]:

$$\Omega_{\text{пр}} = \cos\left(\frac{\pi}{2m}\right) \sqrt{\frac{mM_{\text{ср}}}{2Z_2 J} \frac{60}{\pi}}, \quad (12)$$

где  $Z_2$  – число зубцов на роторе.

В соответствии с изложенной последовательностью расчетных процедур проведена глубокая модернизация универсального двигателя механизма вертикального перемещения и позиционирования регулирующего органа, изначально предназначенного для работы в длительном режиме, в механизмах приводов различного назначения: регулирующих и компенсирующих, стержней [14], совмещенных с функциями АЗ. Основные размеры и масса активных частей этого двигателя представлены в табл. 1, левая колонка.

Из результатов можно сделать заключение, что после модернизации, за счет форсирования тока для подъема груза в приводе АЗ при том же вращающем моменте и на том же диаметре расточки статора, габариты и массу двигателя удалось значительно сократить (табл. 1, правая колонка значений) по сравнению с базовым вариантом (левая колонка значений). Это отразилось в двукратном уменьшении машинной постоянной и расширении диапазона рабочих скоростей, верхняя граница которого определяется частотой приемистости. При этом в новом образце снизился КПД на этой частоте (34,9 % против 38,7 %) за счет больших потерь в меди, однако для машин, эксплуатируемых с весьма кратковременной продолжительностью включения, это снижение не является определяющим фактором.

**Таблица 1.**  
**Основные размеры и масса двигателей**

**Table 1.**  
**The main dimensions and weight of the motors**

Наименование параметра	Значение по вариантам	
	1	2
Потребный момент нагрузки на валу, Н·м	3,92	
Диаметр расточки статора, мм	55	
Линейная нагрузка, А/м	18000	
Осевая длина пакета статора, мм	156	87
Наружный диаметр статора, мм	120	121
Воздушный зазор, мм	0,25	0,35
Масса меди обмоточных проводов, кг	1,44	0,354
Масса ферромагнитных материалов, кг	6,89	4,65
Удельная тепловая нагрузка от электрических потерь, А <sup>2</sup> /м·мм <sup>2</sup>	1474	3293
Длина статора с учетом вылета лобовых частей, мм	199	114
Машинная постоянная (Арнольда), м·с <sup>2</sup> /кг	1,317·10 <sup>-4</sup>	0,670·10 <sup>-4</sup>
Частота приемистости (без привода), об/мин	670	703

#### IV. Выводы

Предложена методика проектирования индукторных двигателей с электромагнитным возбуждением, позволяющая формировать геометрию зубцовых зон статора и ротора с учетом глубокой кратковременной перегрузки по току, без чрезмерного насыщения магнитной цепи, приводящего к непродуктивному нагреву двигателя. Особенностью методики является выбор величины зазора между статором и ротором в строгом соответствии с состоянием ферромагнитных участков магнитной цепи, не допуская их чрезмерного насыщения в положении максимальной проводимости воздушного зазора.

В соответствии с изложенной методикой и ее рекомендациями по выбору геометрии зубцовой зоны статора и наибольшего значения индукции спроектирован и численно исследован индукторный двигатель с электромагнитным возбуждением от постоянной составляющей фазных токов, предназначенный для приведения в рабочее состояние – подьема регулирующего органа аварийной защиты ядерного реактора.

Изложенный подход может быть полезен при проектировании синхронных двигателей с электромагнитным возбуждением, предназначенных

для работы с кратковременной перегрузкой по току, обеспечивая минимизацию влияния реакции якоря на уровень электрических и магнитных потерь.

© Смирнов А.Ю., 2024

© Ульянов Д.А., 2024

© Стасюк П.Г., 2024

© Уснунц-Кригер Т.Н., 2024

*Поступила в редакцию 16.10.2024*

*Принята к публикации 15.11.2024*

*Received 16.10.2024*

*Accepted 15.11.2024*

### **Библиографический список**

- [1] ГОСТ 17137-87. Системы контроля, управления и защиты ядерных реакторов. Термины и определения. Введ. 1988-01-01. М.: Стандартиноформ, 2005. – 10 с.
- [2] НП-082-07. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. Введ. 2008-06-01. М.: Ростехнадзор, 2007. – 26 с.
- [3] Митенков Ф.М., Жучков И.И., Зайцев Б.И., Подтележников И.А. Исполнительные механизмы органов управления и защиты для натриевых реакторов на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1980. – 176 с.
- [4] Юркевич Г.П., Рабкин Ю.Е., Шапошников Л.А. Электроприводы регулирующих органов энергетических реакторов. Основы проектирования. М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
- [5] Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М.: Энергия, 1980. – 928 с.
- [6] Смирнов А.Ю. Электропривод с бесконтактными синхронными двигателями. М.: Инфра-М, 2024. – 200 с.
- [7] Lipo T.A. Introduction to AC machine design. John Wiley & Sons, 2017. DOI: 10.1002/9781119352181
- [8] Смирнов А.Ю. Индукторные машины. Проектирование и вычислительный анализ. М.: Форум, 2015. – 192 с.
- [9] Purhonen J., Jokinen T., Hrabovokova V. Design of rotating electrical machines. Chippenham, Wiltshire: John Wiley & Sons, Ltd, 2008. – 512 p.
- [10] Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1980. – 496 с.
- [11] Копылов И.П., Клоков Б.К. Справочник по электрическим машинам. Т. 2. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.
- [12] Смирнов А.Ю., Александрова Е.Н., Зимин А.Ю. Уточнение моделей расчета момента при проектировании явнополюсных индукторных двигателей // Электричество. 2020. № 11. С. 53-59. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-11-53-59
- [13] Ивоботенко Б.А., Рубцов В.П., Садовский Л.А., Цаценкин В.К., Чиликин М.Г. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями. М.: Энергия, 1971. – 624 с.
- [14] Юркевич Г.П. Системы управления энергетическими реакторами. М.: ЭЛЕКС-КМ, 2001. – 344 с.

## References

- [1] Monitoring, control and protection systems of nuclear reactors. Terms and definitions, GOST 17137-87, Jan. 1988.
- [2] Rules of nuclear safety of reactor installations of nuclear power plants, NP-082-07, June 2008.
- [3] F.M. Mitenkov, I.I. Zhuchkov, B.I. Zaitsev and I.A. Podtelezchnikov, *Ispolnitel'nye mekhanizmy organov upravleniya i zashchity dlya natrievykh reaktorov na bystrykh nejtronah [Control and protection actuators for fast neutron sodium reactors]*. Moscow: Atomizdat, 1980 (in Russian).
- [4] G.P. Yurkevich, Yu.E. Rabkin and L.A. Shaposhnikov, *Elektroprivody reguliruyushchih organov energeticheskikh reaktorov. Osnovy proektirovaniya [Electric drives of control bodies of power reactors. Design principles]*. Moscow: Energoatomizdat, 1985 (in Russian).
- [5] A.V. Ivanov-Smolensky, *Elektricheskie mashiny [Electric machines]*. Moscow: Energy, 1980 (in Russian).
- [6] A.Y. Smirnov, *Elektroprivod s beskontaktnymi sinhronnymi dvigatelyami [Electric drive with contactless synchronous motors]*. Moscow: Infra-M, 2024 (in Russian).
- [7] T.A. Lipo, *Introduction to AC machine design*. John Wiley & Sons, 2017. DOI: 10.1002/9781119352181
- [8] A.Y. Smirnov, *Induktornye mashiny. Proektirovanie i vychislitel'nyj analiz [Inductor machines. Design and computational analysis]*. Moscow: Forum, 2015 (in Russian).
- [9] J. Purhonen, T. Jokinen and V. Hrabovokova, *Design of rotating electrical machines*. Chippenham, Wiltshire: John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [10] I.P. Kopylov, F.A. Goryainov and B.K. Klokov, *Proektirovanie elektricheskikh mashin [Design of electric machines]*. Moscow: Energy, 1980 (in Russian).
- [11] I.P. Kopylov and B.K. Klokov, *Spravochnik po elektricheskim mashinam [Handbook of electric machines]*. Vol. 2. Moscow: Energoatomizdat, 1989 (in Russian).
- [12] A.Yu. Smirnov, E.N. Alexandrova and A.Yu. Zimin, "Refining the torque calculation models in designing salient-pole inductor motors", *Elektrichestvo*, no. 11, pp. 53-59, July 2020. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-11-53-59
- [13] B.A. Ivobotenko, V.P. Rubtsov, L.A. Sadovsky, V.K. Tsatsenkin and M.G. Chilikin, *Diskretnyj elektroprivod s shagovymi dvigatelyami [Discrete electric drive with stepper motors]*. Moscow: Energy, 1971 (in Russian).
- [14] G.P. Yurkevich, *Sistemy upravleniya energeticheskimi reaktorami [Power reactor control systems]*. Moscow: ELEKS-KM, 2001 (in Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Смирнов Александр Юрьевич**, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Alexander Y. Smirnov**, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Ульянов Данил Александрович**, аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Danil A. Ulyanov**, postgraduate student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Стасюк Павел Григорьевич**, инженер-конструктор АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Pavel G. Stasyuk**, design engineer of the JSC «Afrikantov OKBM», Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Уснунц-Кригер Татьяна Николаевна**, кандидат технических наук, доцент Выксунского филиала Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», Нижегородская область, г. Выкса, р.п. Шиморское, Российская Федерация.

**Tatyana N. Usnunts-Kriger**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Vyksa Branch of the National University of Science and Technology «MISiS», Nizhny Novgorod region, Vyksa, Shimorskoye, Russian Federation.

УДК 621.311.1

EDN AGENCY

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ПОГРУЗОЧНОГО КРАНА МОРСКОГО ПОРТА

**Д.Ю. Платонов**ORCID: 0000-0002-5422-9543 e-mail: [brounco@yandex.ru](mailto:brounco@yandex.ru)

Самарский Государственный технический университет

*Самара, Россия***Е.А. Кротков**ORCID: 0009-0004-2937-9154 e-mail: [krotkov.e.a@gmail.com](mailto:krotkov.e.a@gmail.com)

Самарский Государственный технический университет

*Самара, Россия***В.П. Степанов**ORCID: 0009-0005-9354-8677 [aees@samgtu.ru](mailto:aees@samgtu.ru)

Самарский Государственный технический университет

*Самара, Россия*

Развитие Северного морского пути требует создания новых и реконструкции существующих морских портов. В системе электроснабжения морского порта наиболее мощным и распространенным видом электрического оборудования являются погрузочные краны грузоподъемностью от 3 до 50 тонн, характеризующиеся циклическим графиком электрической нагрузки при работе с контейнерами. Оценка расчетной электрической нагрузки портовых погрузочных кранов производится на основе индивидуального графика электрической нагрузки портового погрузочного крана при работе с контейнером массой 6 тонн. Фрагмент индивидуального графика электрической нагрузки портового погрузочного крана представляет из себя реализацию технологического процесса работы портового крана, включающего в себя четыре основных процесса: подъем контейнера, перемещение контейнера в зону погрузки, опускание контейнера, перемещение крана в рабочую область. Представленный в работе график электрической нагрузки портового погрузочного крана, в связи со сравнительно малой величиной электрической нагрузки в момент перемещения контейнера по рабочей области, можно представить в виде модели двухступенчатого графика электрической нагрузки. Показано, что при одновременной работе от 4 до 8 погрузочных кранов вероятностное распределение ординат группового графика электрической нагрузки описывается законом Грамма-Шарлье типа А. Для уточнения расчетной электрической нагрузки найдено аналитическое выражение эксцесса циклического графика электрической нагрузки погрузочного крана при их работе с контейнерным грузом.

**Ключевые слова:** график электрической нагрузки, погрузочный кран, расчетная электрическая нагрузка, система электроснабжения морского порта.

Для цитирования: Платонов Д.Ю., Кротков Е.А., Степанов В.П. Моделирование расчетной электрической нагрузки погрузочного крана морского порта // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 4. С. 21-30. EDN AGENCY

## MODELING CALCULATED ELECTRICAL LOAD OF SEAPORT LOADING CRANE

**D. Yu. Platonov**

ORCID: **0000-0002-5422-9543** e-mail: **brounco@yandex.ru**

Samara State Technical University

*Samara, Russia*

**E.A. Krotkov**

ORCID: **0009-0004-2937-9154** e-mail: **krotkov.e.a@gmail.com**

Samara State Technical University

*Samara, Russia*

**V.P. Stepanov**

ORCID: **0009-0005-9354-8677** aees@samgtu.ru

Samara State Technical University

*Samara, Russia*

The development of the Northern Sea Route requires the creation of new and reconstruction of existing seaports., Port loading cranes with a lifting capacity from 3 to 50 ton are the most powerful and widespread type of electrical equipment in the seaport's power supply system. They are characterized by a cyclic load curve when working with containers. The estimated electrical load of loading port cranes is estimated on the basis of an individual load curve of a port loading crane when working with a container weighing 6 tons. A fragment of an individual graph of the electric load of a loading crane represents the implementation of the technological process of a port crane, which includes four main processes: lifting the container, moving the container to the loading area, lowering the container, moving the crane to the work area. The graph of the electrical load of the port crane presented in the work can be represented as a model of a two-stage electrical load graph due to comparatively small magnitude of the electrical load at the time of moving the container across the work area. It is shown that with simultaneous operation of 4 to 8 loading cranes, the probabilistic distribution of the ordinates of the group graph of the electrical load is described by the Gram-Charlier law of type A. An analytical expression of the kurtosis of the cyclic graph of the electric load of the loading crane during their operation with a container load was found to clarify the estimated electrical load.

**Keywords:** load curve, loading crane, calculated electrical load, seaport power supply system.

**For citation:** D. Yu. Platonov, E.A. Krotkov and V.P. Stepanov, "Modeling calculated electrical load of seaport loading crane", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 21-30, 2024. EDN AGENCY

## 1. Введение

В связи с увеличением морских грузоперевозок через Северный морской путь требуется выполнить реконструкцию морских портов, включая обновление парка погрузочных кранов. Наиболее мощными электроприемниками (ЭП) в системе электроснабжения (СЭС) порта являются погрузочные краны, характеризующиеся циклическим графиком электрической нагрузки (ГЭН). Для выполнения погрузочно-разгрузочных операций в морских портах используется от 5 до 10 погрузочных кранов [1].

Существующие на данный момент исследования о расчетных электрических нагрузках кранов морских портов в отечественной и иностранной, посвящены в первую очередь, исследованию новых типов грузов или погрузочных кранов в рамках СЭС порта, но не направлены в сторону усовершенствования существующего принципа моделирования. В связи с этим, в качестве объекта исследования выбран сам принцип моделирования расчетной электрической нагрузки, а также возможность его применения в специализированных программных комплексах.

Цели и задачи работы: совершенствование математической модели расчетной электрической нагрузки погрузочных кранов в СЭС порта.

Схема питания погрузочных кранов в системе электроснабжения морского порта приведена на рис. 1. Грузочные краны соединены с системой шин низкого напряжения главной понизительной подстанции порта 110/35/10(6) кВ через шкаф низковольтного комплектного устройства, а также специальные электрические колонки, совмещающие в себе функции коммутационного аппарата, счетчика электрической энергии, а также устройств защиты ЭП от перегрузок и токов коротких замыканий.

В зависимости от назначения порта погрузочные краны работают со следующими группами грузов: штучные; навалочные, наливные, лесные. В настоящее время наибольшее распространение среди штучных грузов имеют сухогрузные морские контейнеры, отвечающие требованиям ГОСТ Р 53350-2009 [2].

Работа погрузочного крана с контейнером состоит из следующих операций: подъем контейнера, его перемещение в зону погрузки, его опускание, перемещение крана в рабочую область. Фрагмент индивидуального графика электрической нагрузки погрузочного крана с номинальной мощностью 20 кВт при работе с контейнером представлен на рис. 2, где в период с 0 до 25 сек осуществляется подъем груза, в период с 25 до 60 сек осуществляется перемещение груза, в период с 60 до 85 сек опускание груза, а после 85 сек производится возврат крана в рабочую область [3,4].

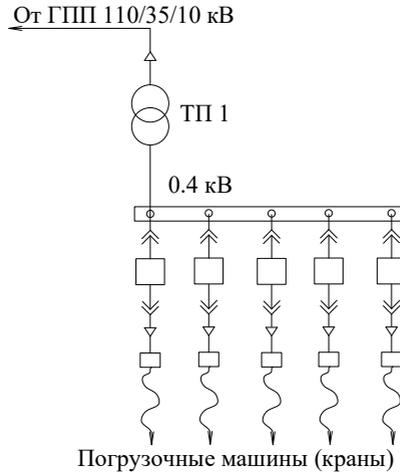


Рис. 1. Схема питания погрузочных кранов

Fig. 1. Power supply diagram of loading cranes

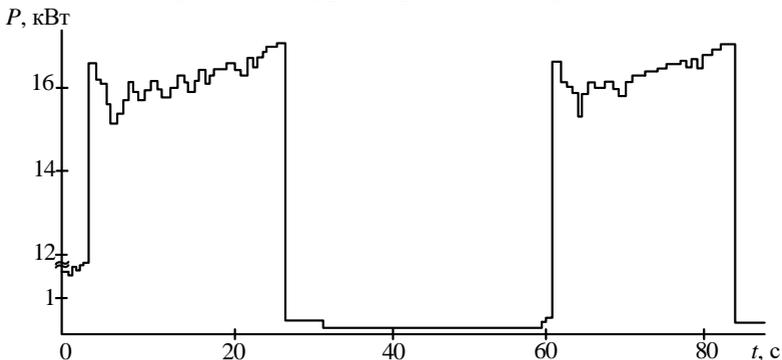


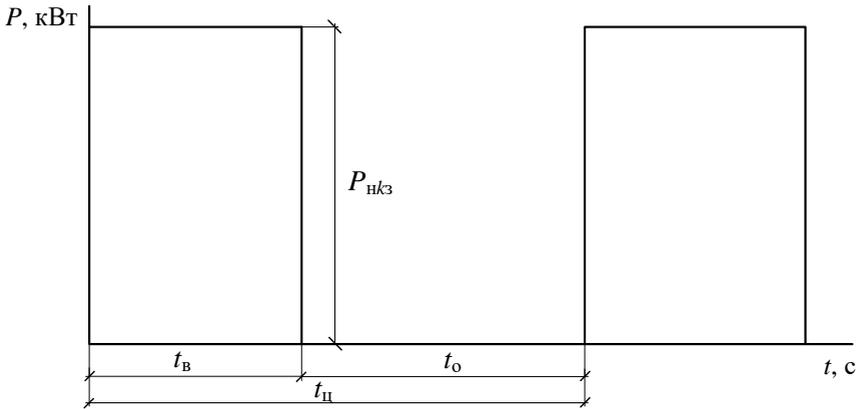
Рис. 2. Фрагмент индивидуального графика электрической нагрузки погрузочного крана при работе с контейнером

Fig. 2. Fragment of an individual load curve of a loading crane when working with a container

В соответствии с фрагментом индивидуального графика (рис. 2), а также временем включения и пауз, индивидуальный график электрической нагрузки погрузочного крана определяется как циклический [5], где время пауз и циклов меняется случайным образом.

Представим фрагмент индивидуального графика электрической нагрузки погрузочного крана моделью двухступенчатого циклического графика (рис. 3). Электрическая нагрузка погрузочного крана во время работы

с контейнером представляет собой дискретную случайную величину (СВ), которая принимает значение  $P_H$  с вероятностью  $k_3$  при подъеме контейнера, и значение  $P = 0$  с вероятностью  $k_0$  при перемещении погрузочного крана.



**Рис. 3. Модель индивидуального графика электрической нагрузки погрузочного крана при работе с контейнером**

**Fig. 3. Model of individual load curve of loading crane when working with container**

Потребление активной мощности в период подъема контейнера  $P_B$ :

$$P_B = P_H \cdot k_3, \quad (1)$$

где:  $P_H$  – номинальная мощность погрузочного крана;  $k_3$  – коэффициент загрузки.

Коэффициент включения  $k_B$ :

$$k_B = \frac{k_H}{k_3}, \quad (2)$$

где  $k_H$  – коэффициент использования.

Коэффициент отключения  $k_0$ :

$$k_0 = 1 - k_B, \quad (3)$$

## II. Основная часть

Из теории электрических нагрузок известно, что аналитические методы расчета характеристики групповых ГЭН базируется на следующей аксиоме [5, 6]:

- нормальный закон распределения вероятностей ординат групповых ГЭН;
- независимость работы отдельных ЭП в группе;
- стационарность процесса потребления электроэнергии группой ЭП.

При числе ЭП  $n \geq 10$ , ГЭН описываются нормальным законом распределения вероятностей ординат графиков [5, 6], а при числе ЭП в группе от 4 до 8 описывается законом распределения Грамма-Шарлье типа А [7-9]:

$$f_A(x) = f(x) - \frac{A}{6} f^{(3)}(x) + \frac{E}{24} f^{(4)}(x), \quad (4)$$

где  $f(x)$  – плотность распределения стандартного нормального закона;

$$A = \frac{\mu_3}{\mu_2 \cdot \sqrt{\mu_2}} = \frac{\mu_3}{DP \cdot \sqrt{DP}} - \text{коэффициент асимметрии, зависящий от второго}$$

$\mu_2$  и третьего  $\mu_3$  моментов;  $E = \frac{\mu_4}{DP^2} - 3$  – коэффициент эксцесса, зависящий от четвертого  $\mu_4$  момента;  $DP$  – дисперсия графика электрической нагрузки.

Таким образом, использование в расчетах характеристик графиков электрических нагрузок, описываемых законом Грамма-Шарлье типа А, требует нахождения третьего и четвертого момента.

Аналитическое выражение для определения третьего момента закона распределения вероятностей ординат суммарных ГЭН получено в [7]. Найдем аналитическое выражение для четвертого момента  $\mu_4$  закона распределения вероятностей ординат ГЭН. В основу вывода выражения для вычисления четвертого момента  $\mu_4$  положена модель работы ЭП в режиме «включено-выключено». Режим «включено» характеризуется за время включения  $t_{\text{в}}$  потреблением постоянной активной мощности (1) и коэффициентом включения  $k_{\text{в}} = t_{\text{в}} / t_{\text{ц}}$  [5], где  $t_{\text{ц}}$  – время цикла. Режим «выключено» за время отключения  $t_{\text{о}}$  характеризуется  $k_{\text{о}} = t_{\text{о}} / t_{\text{ц}} = 1 - t_{\text{в}} / t_{\text{ц}}$ .

Из (2)  $k_{\text{н}} = k_{\text{в}} \cdot k_3$  соответствует значению нагрузки  $P_{\text{н}} \cdot k_3$ , а значению нагрузки 0 – коэффициент  $k_{\text{о}} = 1 - k_{\text{н}} / k_3$ . Таким образом, для модельного индивидуального графика электрической нагрузки ЭП ряд распределения значений электрической нагрузки запишется в виде, представленном в табл. 1. Математическое ожидание и дисперсия СВ электрической нагрузки для графика, изображенного на рис. 3, соответственно равны [10]:

$$\begin{aligned} M(P) &= P_{\text{с}} = P_{\text{н}} \cdot k_{\text{н}}; \\ DP &= P_{\text{н}}^2 \cdot k_{\text{н}} (k_3 - k_{\text{н}}), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $P_{\text{с}}$  – величина средней нагрузки.

**Таблица 1.**

**Ряд распределения значений электрической нагрузки модельного графика для одного погрузочного крана**

**Table 1.**

**A series of distribution of electric load values of the model schedule for one loading crane**

Значения электрической нагрузки $P_i$ , кВт	$P_{ni} \cdot k_3$	0
Вероятность значения электрической нагрузки $e_i$	$k_{ni} / k_3$	$1 - k_{ni} / k_3$

Подставляя значение дискретной СВ электрической нагрузки и соответствующие им вероятности из табл. 1 в формулу четвертого момента [10], получим:

$$k_{ni} = k_3 k_{vi} = \mu_4 = \sum_{i=1}^n P_{ni}^4 \cdot k_{ni} (k_3 - k_{ni}) (k_3^2 + 3k_{ni}^2 - 3k_{ni} k_3). \quad (6)$$

Выражение в круглых скобках представим в виде:

$$k_3^2 - 3k_{ni} k_3 + 2k_{ni}^2 + k_{ni}^2, \quad (7)$$

в котором первые три члена представляют собой квадратный трехчлен. Корни квадратного уравнения равны:

$$k_3 = \frac{3k_{ni} \pm \sqrt{9k_{ni}^2 - 8k_{ni}^2}}{2} = \frac{3k_{ni} \pm k_{ni}}{2}, \quad (8)$$

Из (8) следует, что  $k_3 = 2k_{ni}$  и  $k_3 = k_{ni}$ . Таким образом, квадратный трехчлен, как слагаемое в (7), запишется в следующем виде:

$$k_3^2 - 3k_{ni} k_3 + 2k_{ni}^2 = (k_3 - 2k_{ni})(k_3 - k_{ni}), \quad (9)$$

Подставляя (9) в (7), а (7) в (6), получим выражение для четвертого момента закона распределения ординат индивидуального графика нагрузки одного ЭП:

$$\mu_4 = P_{ni}^4 \cdot k_{ni} (k_3 - k_{ni}) [(k_3 - 2k_{ni})(k_3 - k_{ni}) + k_{ni}^2]. \quad (10)$$

В следующей работе авторы планируют провести анализ возможности использования (10) для более сложных видов циклических графиков электрической нагрузки погрузочного крана.

### III. Заключение

В результате проведенного исследования получено аналитическое выражение эксцесса циклического графика электрической нагрузки погрузочного крана морского порта при работе с контейнерами, которое может быть использовано для моделирования СЭС морского порта в специализированных программных комплексах.

Дальнейшее исследование будет посвящено оценке вероятностных характеристик группового графика электрической нагрузки при моделировании графиков электрической нагрузки погрузочного крана с учетом рекуперации.

© Платонов Д.Ю., 2024

© Кротков Е.А., 2024

© Степанов В.П., 2024

*Поступила в редакцию 27.04.2024*

*Принята к публикации 16.07.2024*

*Received 27.04.2024*

*Accepted 16.07.2024*

### Библиографический список

- [1] Толокнова О.М., Саушев А.В., Шошмин В.А. Методы расчета электрических нагрузок для оптимизации процесса электроснабжения морских и речных портов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2019. Т. 2. С. 57-60.
- [2] Официальная статистическая информация // Росморречфлот. [Электронный ресурс]. URL: [https://morflot.gov.ru/glavnaya/otkryitoe\\_agentstvo/of\\_stat\\_info/](https://morflot.gov.ru/glavnaya/otkryitoe_agentstvo/of_stat_info/) (дата обращения 01.02.2024).
- [3] Alasali F., Luque A., Mayer R., Holderbaum W. A Comparative Study of Energy Storage Systems and Active Front Ends for Networks of Two Electrified RTG Cranes // *Energies*. 2019. № 12 (9). DOI: 10.3390/en12091771
- [4] Harrison I., Pietrosanti S., Luque A., Mayer R., Holderbaum W. Recording and analysing measurements from an RTG crane // *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 2018. V. 125. P. 284-293. DOI: 10.1016/J.MEASUREMENT.2018.04.089
- [5] Шидловский А.К., Вагин Г.Я., Куренный Э.Г. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
- [6] Шидловский А.К., Куренный Э.Г. Введение в статистическую динамику систем электроснабжения. Киев: Науч. думка, 1984. – 271 с.
- [7] Жежеленко И.В., Кротков Е.А., Степанов В.П. Методы вероятностного моделирования в расчетах характеристик электрических нагрузок потребителей. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 217 с.

- [8] Гудков А.В. Расчет электрических нагрузок на низших ступенях иерархии систем электроснабжения машиностроительных предприятий: автореф. дис. канд. техн. наук, СамГТУ, Самара, 2009. – 20 с.
- [9] Идиатулин Р.Ф. Совершенствование иерархически-структурного метода расчета электрических нагрузок на машиностроительных предприятиях: автореф. дис. канд. техн. наук, СамГТУ, Самара, 2012. – 20 с.
- [10] Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа, 1999. – 576 с.

### References

- [1] O.M. Toloknova, A.V. Saushev and V.A. Shoshmin, “Metody rascheta elektricheskikh nagruzok dlya optimizacii processa elektrosnabzheniya morskikh i rechnyh portov [Methods of calculating electrical loads for optimizing the process of power supply to sea and river ports]”, *Transactions of the international symposium on reliability and quality*, vol. 2, pp. 57-60, 2019 (in Russian).
- [2] Oficial'naya statisticheskaya informaciya [Official statistical information]. [Online]. Available at: [https://morflot.gov.ru/glavnaya/otkryitoe\\_agentstvo/of\\_stat\\_info/](https://morflot.gov.ru/glavnaya/otkryitoe_agentstvo/of_stat_info/) [Accessed: Feb. 1, 2024] (in Russian).
- [3] F. Alasali, A. Luque, R. Mayer and W. Holderbaum, “A Comparative Study of Energy Storage Systems and Active Front Ends for Networks of Two Electrified RTG Cranes”, *Energies*, vol. 12, no. 9, 2019. DOI: 10.3390/en12091771
- [4] I. Harrison, S. Pietrosanti, A. Luque, R. Mayer and W. Holderbaum, “Recording and analysing measurements from an RTG crane”, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 125, pp. 284-293, Sep. 2018. DOI: 10.1016/J.MEASUREMENT.2018.04.089
- [5] A.K. Shidlovsky, G.Ya. Vagin and E.G. Kurenny, *Raschety elektricheskikh nagruzok sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatij [Calculations of electrical loads of power supply systems of industrial enterprises]*. Moscow: Energoatomizdat, 1992 (in Russian).
- [6] A.K. Shidlovsky and E.G. Kurenny, *Vvedenie v statisticheskuyu dinamiku sistem elektrosnabzheniya [Introduction to the statistical dynamics of power supply systems]*. Kiev: Nauch. dumka, 1984 (in Russian).
- [7] I.V. Zhezhelchenko, E.A. Krotkov and V.P. Stepanov, *Metody veroyatnostnogo modelirovaniya v raschyotah harakteristik elektricheskikh nagruzok potrebitelej [Methods of probabilistic modeling in calculations of characteristics of electrical loads of consumers]*. M.: Energoatomizdat, 2003 (in Russian).
- [8] A.V. Gudkov, “*Raschet elektricheskikh nagruzok na nizshih stupenyah ierarhii sistem elektrosnabzheniya mashinostroitel'nykh predpriyatij [Calculation of electrical loads at the lowest levels of the hierarchy of power supply systems of machine-building enterprises]*”, Cand. of Tech. S. thesis, SSTU, Samara, Russia, 2009 (in Russian).
- [9] R.F. Idiutulin, “*Sovershenstvovanie ierarhicheskoi-strukturnogo metoda rascheta elektricheskikh nagruzok na mashinostroitel'nykh predpriyatiyah [Improvement of the hierarchical-structural method of calculating electrical loads at machine-building enterprises]*”, Cand. of Tech. S. thesis, SSTU, Samara, Russia, 2012 (in Russian).
- [10] E.S. Ventzel, *Teoriya veroyatnostej [Probability theory]*. Moscow: Higher school, 1999 (in Russian).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ  
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Платонов Дмитрий Юрьевич**, аспирант Самарского государственного технического университета, г. Самара, Российская Федерация. **Dmitriy Yu. Platonov**, postgraduate student of the Samara State Technical University, Samara, Russian Federation.

**Кротков Евгений Александрович**, кандидат технических наук, доцент Самарского государственного технического университета, г. Самара, Российская Федерация. **Evgeniy A. Krotkov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Samara State Technical University, Samara, Russian Federation.

**Степанов Валентин Павлович**, доктор технических наук, профессор Самарского государственного технического университета, г. Самара, Российская Федерация. **Valentine P. Stepanov**, D. Sci. (Eng.), professor of the Samara State Technical University, Samara, Russian Federation.

УДК: 629.4.012

EDN GNALPC

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА  
ВЫПРЯМИТЕЛЬНОГО ИНВЕРТОРНОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ  
РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИХ  
ТОРМОЗОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

**Е.Л. Рыжова**

ORCID: 0000-0001-7984-2558 e-mail: [elena-astanovskaja@rambler.ru](mailto:elena-astanovskaja@rambler.ru)

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

*Санкт-Петербург, Россия*

**В.Ю. Осипов**

ORCID: 0009-0009-4566-3274 e-mail: [osipov.power@yandex.ru](mailto:osipov.power@yandex.ru)

Эксплуатационное локомотивное депо «Саратов – Пассажирское»

структурного подразделения Приволжской дирекции тяги

структурного подразделения Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД»

*Саратов, Россия*

Задача повышения безопасности и эффективности эксплуатации подвижного состава решается с помощью внедрения новейших автоматизированных систем контроля и диагностики оборудования. Рассмотрено применение микропроцессорной системы управления и диагностирования для безразборного контроля наиболее важных параметров, определяющих действительное техническое состояние узлов электровоза серии ЭП1. С помощью автоматизированной системы контроля и диагностики были обнаружены «броски» тока в инверторном режиме при рекуперативном торможении электровоза, а также наводимые помехи во входной цепи измерительной системы локомотива. Для исключения выявленных неисправностей предлагается изменить схему монтажа проводов в системе датчиков углов коммутации и провести ряд мероприятий с целью уменьшения емкостной наводки в измерительной системе электровоза.

**Ключевые слова:** автоматизированные системы контроля и диагностики, бросок тока, инверторный режим, коммутации, паразитная емкость, рекуперативное торможение, техническое диагностирование, электропневматический тормоз.

**Для цитирования:** Рыжова Е.Л., Осипов В.Ю. Техническая диагностика выпрямительного инверторного преобразователя в режиме рекуперативного торможения при использовании электропневматических тормозов электроподвижного состава // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 4. С. 31-46. EDN GNALPC

# TECHNICAL DIAGNOSTICS OF RECTIFIER INVERTER CONVERTER IN REGENERATIVE BRAKING MODE WHEN USING ELECTROPNEUMATIC BRAKES OF ELECTRIC ROLLING STOCK

**E.L. Ryzhova**

ORCID: 0000-0001-7984-2558 e-mail: [osipov.power@yandex.ru](mailto:osipov.power@yandex.ru)

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
*Saint Petersburg, Russia*

**V.Yu. Osipov**

ORCID: 0009-0009-4566-3274 e-mail: [osipov.power@yandex.ru](mailto:osipov.power@yandex.ru)

Saratov – Passenger Operational Locomotive Depot – structural subdivision of the Volga Traction Directorate of the structural subdivision of the Traction Directorate – branch of JSC Russian Railways  
*Saratov, Russia*

**Abstract.** Improving the safety and efficiency of rolling stock operation is solved through the introduction of the latest automated systems for monitoring and diagnostics of equipment. The article considers the use of a microprocessor control and diagnostic system for the non-selective control of the most important parameters that determine the actual technical condition of the EP1 series electric locomotive units. Current "surges" in inverter mode during regenerative braking of an electric locomotive were detected using an automated monitoring and diagnostics system. In addition, induced interference was detected in the input circuit of the locomotive's measuring system. It is proposed to change the wiring diagram in the switching angle sensor system to eliminate the identified malfunctions and to carry out a number of measures to reduce capacitive interference in the electric locomotive's measuring system.

**Keywords:** automated monitoring and diagnostic systems, current surge, electro-pneumatic brake, inverter mode, parasitic capacitance, regenerative braking, switching, technical diagnostics.

**For citation:** E.L. Ryzhova and V.Yu. Osipov, "Technical diagnostics of rectifier inverter converter in regenerative braking mode when using electropneumatic brakes of electric rolling stock", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 31-46, 2024. EDN GNALPC

## I. Введение

Локомотивное хозяйство является одним из важнейших элементов инфраструктуры железнодорожного транспорта, от организации работы которого в значительной мере зависят как устойчивость работы дороги, так и себестоимость железнодорожных перевозок, значительную часть которых

определяют затраты на техническое содержание подвижного состава и ремонт электровозов. Затраты локомотивного хозяйства составляют треть всех эксплуатационных расходов железных дорог.

Целью системы технического обслуживания и ремонта является управление техническим состоянием подвижного состава в течение срока его службы до списания, позволяющее обеспечить уровень его надежности в эксплуатации, минимизировать затраты времени, труда и средств на выполнение операций по обслуживанию и ремонту.

За последнее десятилетие произошли принципиальные изменения в конструкциях подвижного состава, внедрялись новые технологии ремонта, менялись условия эксплуатации. Поэтому традиционная система технического обслуживания и ремонта, основанная на выполнении заданного объема работ через определенный интервал календарного времени по пробегу, перестала в полной мере удовлетворять возросшим требованиям к безопасности движения и технико-экономической эффективности. При существующей системе технического содержания и ремонта локомотивного парка затраты на его восстановление за период от начала эксплуатации до постановки локомотива на капитальный ремонт в 3,5-4,0 раза превышают его первоначальную стоимость. Правильно рассчитать и организовать длительную эксплуатацию такой сложной технической системы, как электровоз, можно лишь в случае, если при ее разработке предприятиям будут известны все показатели эффективности функционирования основных узлов и элементов на всех этапах их существования, т.е. от момента проектирования до полной выработки ресурса в регламентированных условиях эксплуатации.

Используемый в технике термин «диагноз» означает заключение о техническом состоянии объекта – техническое диагностирование. При одном и том же техническом состоянии объект может быть для различных условий признан исправным или неисправным. В ходе диагностирования производят оценку большого числа диагностических признаков и параметров. Для получения исходной информации для диагностики работы локомотива необходимо изучить закономерности выработки технического ресурса основных узлов, оценить влияние воздействующих факторов на интенсивность их эксплуатационного старения и износа, выявить элементы, лимитирующие надежность сложной системы, разработать пути улучшения их конструкций, изыскать возможность совершенствования методов расчета и контроля текущего состояния [1, 2].

Развитие информационных технологий, средств контроля и диагностики, вычислительной техники, автоматизированных систем неразрушающего контроля позволило создать автоматизированные системы контроля и диагностики (АСКД), а также информационно-технические комплексы по управлению системой ремонта и вплотную перейти к организации ремонта

с учетом информации о техническом состоянии оборудования для обеспечения требуемого уровня надежности и экономичности, минимизации расходов при техническом обслуживании и ремонте на основе предупреждения отказов в пути следования и рационального использования ресурса оборудования подвижного состава [3, 4].

## **II. Объект и методика**

При диагностике работы локомотива необходимо учитывать основные причины неисправностей электровозов [2, 5-7]:

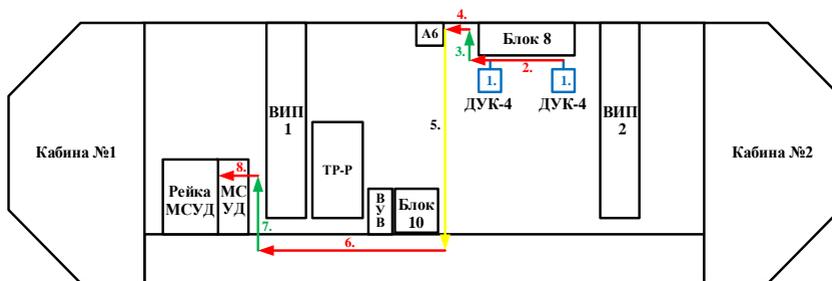
– неудовлетворительное качество текущего ремонта и технического обслуживания;

– нарушение режима управления локомотивными бригадами.

В начальный период эксплуатации интенсивность потока отказов превышает средний уровень в 3-4 раза. Диагностика различных узлов электровоза выполняется на пункте технического обслуживания локомотивов (электровозов) (при ТО-2) и на (ТР-1), причем состав диагностируемых узлов зависит от особенностей технического состояния локомотивов данного депо, а необходимость диагностирования либо строго регламентируется (например, приурочивается к каждому ТО-2), либо определяется для каждого электровоза в отдельности, либо обуславливается наличием соответствующих замечаний локомотивных бригад о состоянии электровоза в пути следования. Наиболее эффективным является период от эксплуатации по заранее назначенному ресурсу к эксплуатации и техническому обслуживанию по данным безразборного контроля наиболее важных параметров, определяющих действительное техническое состояние узлов. Безразборный контроль технического состояния в целом обосновывает применение комплексов для диагностирования, позволяющих получить информацию о техническом состоянии наиболее важных диагностируемых параметров. Предлагаемый метод функционального диагностирования позволяет не только выявить развивающуюся неисправность и предотвратить необратимое явление, но и обнаружить развивающийся дефект на ранней стадии, планировать сроки и объемы ремонта оборудования [8-10].

За период эксплуатации электровозов серии ЭП1 отмечались неоднократные замечания локомотивных бригад о некорректной работе рекуперативного тормоза в части «бросков тока» в режиме рекуперации, отраженные в журнале технического состояния локомотива формы ГУ-152.

Для анализа отказов электровозов по основным направлениям диагностируемых контролируемых параметров выбраны узлы электровоза серии ЭП1 (рис. 1).



**Рис. 1. Расположение оборудования и схема монтажа проводов на электровозе серии ЭП1**

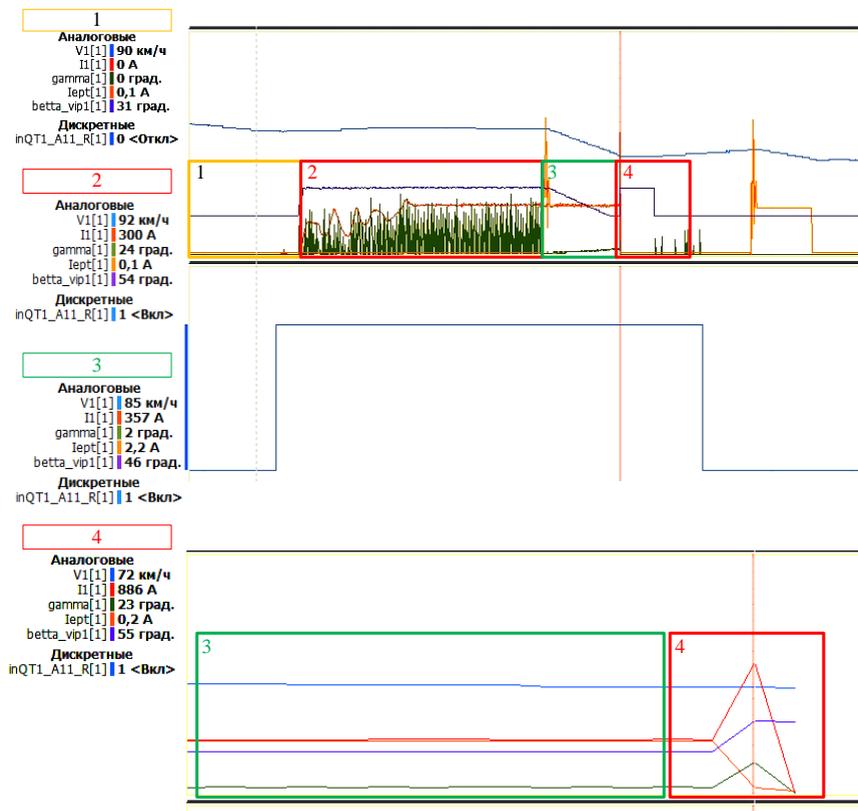
**Fig. 1. Location of the equipment and wiring diagram on the EP1 series electric locomotive**

В качестве выпрямительной установки на электровозах серии ЭП1 устанавливаются два выпрямительно-инверторных преобразователя (ВИП) ВИП-5600, которые предназначены для выпрямления однофазного переменного тока частотой 50 Гц в постоянный и плавного регулирования напряжения питания тяговых электродвигателей в режиме тяги, а также для преобразования постоянного тока в однофазный переменный ток частотой 50 Гц и плавного регулирования величины противоЭДС инвертора в режиме рекуперативного торможения. Четыре датчика угла коммутации (ДУК) ДУК-4 предназначены для передачи сигнала, пропорционального углу коммутации ВИП в режиме рекуперативного торможения. В качестве системы управления и диагностики на электровозах серии ЭП1 применяется микропроцессорная система управления и диагностики (МСУД), которая обеспечивает автоматическое управление электроприводом и электрическими аппаратами электровоза в режимах тяги и торможения [11].

На электровозах серии ЭП1 применяется двухпроводный электропневматический тормоз (ЭПТ). Локомотив оборудован электровоздухораспределителем (ЭВР) ЭВР-305М, который устанавливается совместно с воздухораспределителем (ВР) ВР-292М. ЭВР-305М предназначен для управления изменением давления сжатого воздуха в тормозном цилиндре пассажирского локомотива или вагона.

Для определения причины неисправностей проведен анализ фрагмента файла поездки МСУД электровоза ЭП1 с поездом (рис. 2).

Для расшифровки показаний, изложенных на данном фрагменте, необходимо разбить его на четыре условные зоны, которые определяются по положению крана машиниста усл. № 395:



**Рис. 2. Фрагмент файла МСУД:**

V1 – скорость движения электровоза; I1 – ток тягового электродвигателя;  
 beta\_vip1 – угол запаса инвертора ( $\beta$ ) в инверторном режиме;  
 gamma – угол коммутации ВИП ( $\gamma$ ) в инверторном режиме; Iept – ток ЭПТ

**Fig. 2. Fragment of the microprocessor control and diagnostic system file:**

V1 is the speed of the electric locomotive; I1 is the current of the traction motor;  
 beta\_vip1 is the inverter reserve angle ( $\beta$ ) in inverter mode; gamma is the switching  
 angle of the rectifier-inverter converters ( $\gamma$ ) in the inverter mode;  
 Iept is the electropneumatic brake current

зона 1 – положение крана машиниста усл. № 395 во II «Поездном положении», локомотив следует в режиме выбега (обозначена оранжевым цветом);

зона 2 – положение крана машиниста усл. № 395 во II «Поездном положении», локомотив следует в режиме рекуперативного торможения (обозначена красным цветом);

зона 3 – положение крана машиниста усл. № 395 в V и IV положениях торможения и перекрыши, локомотив следует в режиме рекуперативного торможения (обозначена зеленым цветом);

зона 4 – положение крана машиниста усл. № 395 в I положении «Отпуск», локомотив следует в режиме рекуперативного торможения (обозначена красным цветом).

В ходе анализа фрагмента файла поездки при рассмотрении зоны 2 наблюдаются нестабильные показания угла коммутации  $\gamma$ : до момента перехода в зону 3 значение угла коммутации  $\gamma$  меняется от 9 до 24 градусов порядка 30 раз, а значение угла запаса инвертора  $\beta$  выросло с 31 до 54 градусов, что свидетельствует о нарушении коммутации в инверторном режиме.

При рассмотрении зоны 3 после постановки ручки крана машиниста усл. № 395 в V положение (торможение) наблюдается стабилизация значения угла коммутации  $\gamma$ , которое находится в пределах 8-10 градусов, а значение угла запаса инвертора  $\beta$  снижается с 54 до 46 градусов и становится меньше до момента перехода к зоне 4.

При рассмотрении зоны 4 происходит постановка ручки крана машиниста в I положение (отпуск, зарядка) и наблюдается увеличение значения угла коммутации  $\gamma$  с 8 до 23 градусов, а значение угла запаса инвертора  $\beta$  становится равным 55 градусов, после чего происходит увеличение тока якоря тяговых электродвигателей с 357А до 886А с дальнейшим срабатыванием защиты – отключение быстродействующих выключателей всех тяговых электродвигателей (ТЭД). На МСУД данное неконтролируемое увеличение тока якоря тягового электродвигателя обозначается как «бросок» тока. Угол коммутации  $\gamma$  меняется при изменении сопротивления активно-индуктивной нагрузки цепи переменного тока вследствие перемещения электроваза в межподстанционной зоне и изменения условия питания этой зоны. «Броски» тока могут происходить в случае, если коммутация не завершится в пределах полупериода инвертирования, тогда в следующем полупериоде ( $\omega t = \pi$ ) при изменении полярности напряжения трансформатора произойдет обратная коммутация и напряжение трансформатора будет соответствовать ЭДС тяговых двигателей, а ток генераторного режима в цепи двигателей будет интенсивно нарастать [12, 13].

В этот полупериод происходит выпрямление, т.е. энергия сети передается в цепь выпрямленного тока и совместно с энергией, генерируемой ТЭД, накапливается в индуктивностях цепи, в основном, в сглаживающих

реакторах. В следующем полупериоде при изменении полярности напряжения трансформатора возобновляется инверторный режим, ток начинает падать, но к моменту начала инверторной коммутации он существенно превышает свое значение в конце первого полупериода, когда и при меньшем токе коммутация не завершилась (рис. 3). Таким образом, даже однократное нарушение коммутации в инверторном режиме приводит к аварийному нарастанию тока [11].

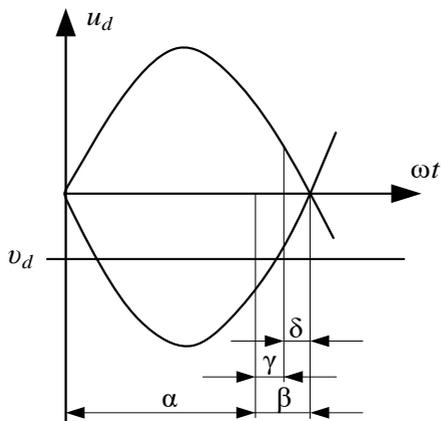


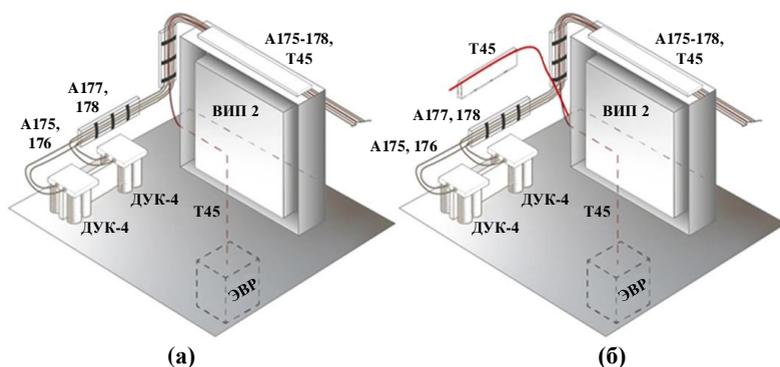
Рис. 3. Кривая выпрямленного напряжения в инверторном режиме

Fig. 3. Rectified voltage curve in inverter mode

Из проведенного анализа фрагмента файла поездки прослеживается связь между положениями крана машиниста усл. № 395 в ЭПТ в рекуперативном торможении (инверторном режиме). Таким образом, применение ЭПТ в рекуперативном торможении влияет на значения угла коммутации  $\gamma$  и угла запаса инвертора  $\beta$ . Но, поскольку значение угла запаса инвертора  $\beta$  находится в прямой зависимости от значения угла коммутации  $\gamma$ , применение ЭПТ в рекуперативном торможении влияет только на значение угла коммутации  $\gamma$ . Согласно вышеизложенному, за формирование и передачу сигнала угла коммутации  $\gamma$  отвечает датчик угла коммутации ДУК-4. Необходимо отметить, что в данном случае ЭПТ и датчики угла коммутации находятся в исправном состоянии.

При анализе фрагмента файла поездки необходимо рассматривать связь ЭПТ с ДУК-4 в местах пересечения проводов ДУК-4 и ЭВР-305М при их монтаже. Данное место пересечения проводов обнаружено в районе ВИП-2 и находится на вертикальном кронштейне для крепления проводов рядом с блоком 8 и на кронштейне, который находится над самим ВИП-2. ДУК-4: провода А175,176 и А177,178; ЭВР305М: провод Т45 (рис. 4, а).

МСУД обеспечивает управление ВИП-5600 в режиме тяги и рекуперативного торможения. Для того, чтобы учитывать изменение нагрузки – индуктивности и активного сопротивления цепи переменного тока вследствие перемещения электровоза в межподстанционной зоне и изменения условия питания этой зоны на электровозе, установлены датчики угла коммутации ДУК-4. На электровозе ЭП1 находится четыре датчика угла коммутации – по два датчика на каждый ВИП. Поскольку при анализе фрагмента файла поездки была определена связь между положениями крана машиниста усл. № 395 в ЭПТ и датчиками угла коммутации необходимо рассмотреть ДУК-4, которые находятся рядом с ВИП-2, так как здесь проходит провод Т45, который подключается к ЭВР-305М (рис. 4, б).

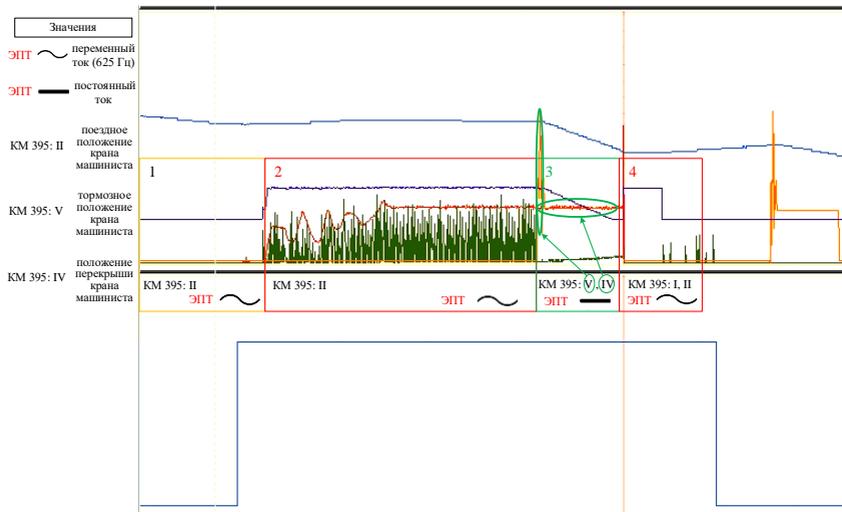


**Рис. 4.** Схема крепления проводов А175-178 и провода Т45, подключаемого к ЭВР на кронштейнах по штатным схемам (а) и (б)

**Fig. 4.** Wiring diagram А175-178 and wire Т45 connected to the electric air distributor according to the standard schemes (а) and (b)

Необходимо рассмотреть работу в цепи ЭПТ при различных положениях крана машиниста усл. № 395. При постановке ручки крана машиниста усл. № 395 во II положение через провод Т45 к ЭВР-305М подается переменное напряжение с частотой 625 Гц и амплитудой 50 В. При постановке ручки крана машиниста усл. № 395 в положении V или IV через провод Т45 к ЭВР-305М подается постоянное напряжением 50 В.

Для анализа цепи датчиков угла коммутации ДУК-4 наблюдения перенесены на рассматриваемый фрагмент файла поездки (рис. 5). Согласно электрической схеме электровоза ЭП1, датчики угла коммутации установлены до ВИП, значит, через провода А175-178 проходит переменный ток частотой 50 Гц. Далее данные провода с одной стороны подключаются на клеммной рейке МСУД, а с другой – к выводам обмоток датчиков угла коммутации [8].



**Рис. 5. Фрагмент файла поездки с учетом подаваемого напряжения**

**Fig. 5. Fragment of the trip file, taking into account the supplied voltage**

Таким образом, анализ фрагмента файла поездки с учетом подаваемого напряжения показал, что при нахождении ручки крана машиниста усл. № 395 во II положении через провод Т45 к ЭВР-305М подается переменное напряжение частой 625 Гц амплитудой 50 В, в проводах А175-178 датчиков угла коммутации так же проходит переменный ток частотой 50 Гц. При этом в зонах 2 и 4 наблюдаются сильные изменения значений угла коммутации  $\gamma$  в пределах от 8 до 40 градусов и резкое увеличение значения угла запаса инвертора  $\beta$  с 31 до 55 градусов. Но при нахождении ручки крана машиниста усл. № 395 в V и IV положениях через провод Т45 к ЭВР-305М подается постоянное напряжение 50 В, при этом в 3-й зоне наблюдается стабилизация значений угла коммутации  $\gamma$ , которые находятся в пределах от 8-10 градусов, а значение угла запаса инвертора  $\beta$  снижается с 55 градусов и стремится к исходному значению в 31 градус (рис. 5).

Установленная закономерность в совокупности с выявленным пересечением проводов А175-178 датчиков угла коммутации и провода Т45 ЭВР-305М (рис. 4, а) приводит к тому, что от провода Т45 наводятся помехи на провода А175-178, что, в свою очередь, приводит к некорректному формированию и передачи сигналов на МСУД. После этого происходит нарушение коммутации ВИП в инверторном режиме, что соответственно приво-

дит к аварийному нарастанию тока якоря тягового электродвигателя – «бросок» тока. В завершение процесса нарастания тока происходит аварийное отключение всех ТЭД через быстродействующие выключатели [9, 10].

### III. Результаты исследования

Всегда существует некоторая «паразитная» емкость между входом измерительной системы и какой-либо расположенной вблизи линией переменного напряжения. В результате во входной цепи измерительной системы будут наводиться помехи. В этом случае обозначается, что существует емкостная связь измерительной системы и источника помехи. Для уменьшения емкостной наводки необходимо удалить средство измерения от внешних проводов, уменьшить выходное сопротивление объекта, а также входное сопротивление средства измерения, экранировать входную цепь средства измерения, поместив ее в заземленный проводящий экран.

Кроме того, из-за большого числа случаев аварийного нарастания тока – «бросков» тока в инверторном режиме может произойти повреждение ВИП, ТЭД, с дальнейшим их выходом из строя. Для решения данной проблемы необходимо удалить провода А175-А178 от источника помехи (провод Т45) путем изменения укладки монтажа проводов А175-178 или провода Т45 или максимально возможно развести данные провода друг от друга на одном кронштейне. Провод Т45 можно отвести в противоположную сторону от проводов А175-178 (рис. 4, 6). Также существует вариант, при котором отсутствует необходимость замены направления монтажа вышеуказанных проводов, но тогда для исключения наводки (помехи) следует экранировать провод Т45 или провода А175-178. Учитывая большое количество изгибов проводов, необходимо увеличить их длину (рис. 6).

Для исключения неисправности – «бросков» тока в режиме рекуперации – предлагается изменить схему монтажа проводов А175-178 на электровозе серии ЭП1 (рис. 1). Четыре провода идут от каждого ДУК (1) далее по горизонтальному кронштейну (2). Провода соединяются в одной точке и далее идут по вертикальному кронштейну (3), после чего проходят по горизонтальному кронштейну (4) панели защиты БР от перегрузок (А6). Затем они переходят по перпендикулярному кронштейну для проводов (5), проходя через все ВВК, и доходят до пневматического блока № 10. Далее провода заходят в место укладки монтажа проводов (6) над коридором электровоза и проходят до клеммной рейки (7) МСУД-Н на клеммы А175-178 (8).



тягового электродвигателя – «броску» тока. В завершение процесса нарастания тока происходит аварийное отключение всех ТЭД через быстродействующие выключатели.

Проведенный анализ дает основание заключить, что готовность локомотива к нормальному функционированию ограничивается, прежде всего, интенсивной выработкой технического ресурса электрических соединений и электронных блоков регулировки. Предлагаемый метод функционального диагностирования позволяет не только выявить развивающуюся неисправность и предотвратить необратимое явление, но и обнаруживать развивающийся дефект на ранней стадии, планировать сроки и объемы ремонта оборудования. Применение информационно-измерительных АСКД позволяет автоматизировать технологию и организацию технического обслуживания и текущего ремонта электровозов [14, 15].

Для существующего парка электровозов диагностика в настоящее время не заменяет плановую систему содержания, а является дополнением к ней. Внедрение аппаратуры диагностики в традиционную планово-предупредительную систему ремонта приводит к ее индивидуализации, адаптации к техническому состоянию каждого электровоза в отдельности за счет изменения ранее единых для всего парка норм периодичности и объема ремонта или ТО-2. Оперативные решения по устранению неисправности в большинстве случаев могут приниматься и без использования автоматизированной системы контроля и диагностики, поскольку алгоритм диагностического комплекса вырабатывает информацию о техническом состоянии проверяемых узлов в виде, позволяющую сопоставить фактическое значение контролируемых параметров со значением браковочных. В этом случае роль АСКД сводится только к распечатке протоколов диагностирования и к пополнению базы данных с последующим хранением и использованием массива статистических данных, необходимого для решения неоперативных задач и оценки остаточного ресурса узлов локомотива.

© Рыжова Е.Л., 2024

© Осипов В.Ю., 2024

*Поступила в редакцию 23.06.2024*

*Принята к публикации 11.07.2024*

*Received 23.06.2024*

*Accepted 11.07.2024*

### **Библиографический список**

- [1] Четвергов В.А., Овчаренко С.М., Бухтеев В.Ф. Техническая диагностика локомотивов. Москва: УМЦ ЖДТ, 2020. – 371 с.

- [2] Аболмасов А.А., Лисин Д.О., Мельников В.А. Совершенствование методов диагностирования электрических машин локомотивов по данным микропроцессорных систем управления // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2019. № 3 (69). С. 69-75. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).69-75
- [3] Губарев П.В., Шапшал А.С., Шабаев В.В. Методы диагностирования электрических цепей локомотивов // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2021. № 4. С. 155-161. DOI 10.36652/0202-3350-2021-22-4-155-161
- [4] Лакин И.К., Семченко В.В., Семенов А.П. Автоматизация управления надежностью оборудования локомотивов // *Локомотив*. 2020. № 9 (765). С. 35-36.
- [5] Губарев П.В., Глазунов Д.В., Яицков И.А. Надежность подвижного состава. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2021. – 80 с.
- [6] Вдовенко М.Ю., Зотов М.Д., Мельников В.А. Устройство для регистрации данных телеметрии тягового электродвигателя: предпосылки создания и особенности диагностики // *Вестник Института Проблем Естественных Монополий: Техника железных дорог*. 2022. № 1 (57). С. 31-37.
- [7] Бурченков В.В. Автоматизация технического контроля и диагностики подвижного состава железных дорог. Гомель: БелГУТ, 2020. – 254 с.
- [8] Лакин И.К., Мельников В.А. Организация ремонта тепловозов по диагностическим данным современных МСУ // *Современные проблемы железнодорожного транспорта*, Март 21-22, 2019, Москва, Россия. М.: РУТ, 2019. Т. 1. С. 32-39.
- [9] Цихалевский И.С., Русаков А.Г. Ключевой показатель нового бизнес-процесса организации эксплуатации и ремонта как инструмент контроля технического состояния локомотивов // *Вестник Уральского Государственного Университета Путей Сообщения*. 2021. № 1 (49). С. 40-45. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-1-40-45
- [10] Семенов А.П. Модель управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования: автореф. дис. докт. техн. наук, МИИТ, Москва, 2022. – 379 с.
- [11] Знанок В.Н., Линьков А.О., Мельниченко О.В. Выпрямительно-инверторный преобразователь электровоза на базе IGBT-транзисторов как способ повышения пропускной способности участков железной дороги // *Известия Транссиба*. 2021. № 1 (45). С. 66-75.
- [12] Хромов И.Ю. Анализ влияния режимов эксплуатации на техническое состояние локомотивов: автореф. дис. канд. техн. наук, РУТ, Москва, 2021. – 181 с.
- [13] Технологическое и диагностическое оборудование для депо, НИИТКД. [Электронный ресурс]. URL: [www.niitkd.com](http://www.niitkd.com) (дата обращения 28.07.2024).
- [14] Матюхин В.Г. Искусственный интеллект транспорта (ИСУЖТ) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vniias.ru/images/img/ISUZHT/pdf/2019.pdf> (дата обращения 28.07.2024).
- [15] Семенов А.П., Семченко В.В., Лакин И.К. Перспективы развития цифровых технологий в сервисных ремонтных локомотивных депо // *Локомотив*. 2020. № 11. С. 2-5.

## References

- [1] V.A. Chetvergov, S.M. Ovcharenko and V.F. Bukhteev, *Tekhnicheskaya diagnostika lokomotivov [Technical diagnostics of locomotives]*, Moscow: UMTS ZhDT, 2020 (in Russian).
- [2] A.A. Abolmasov, D.O. Lisin and V.A. Melnikov, “Improving the methods of diagnosing electric machines of locomotives according to the data of microprocessor control systems”, *Modern technologies. System analysis. Modeling*, vol. 3, no. 63, pp. 69-75, 2019. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).69-75
- [3] P.V. Gubarev, A.S. Shapshal and V.V. Shabaev, “Methods for diagnosing electrical problems locomotive chains”, *Assembly in mechanical engineering, instrumentation*, no. 4, pp. 155-161, 2021. DOI 10.36652/0202-3350-2021-22-4-155-161
- [4] I.K. Lakin, V.V. Semchenko and A.P. Semenov, “Avtomatizatsiya upravleniya nadyozhnost'yu oborudovaniya lokomotivov [Automation of reliability control of locomotives equipment]”, *Locomotive*, vol. 9, no. 765, pp. 35-36, 2020 (in Russian).
- [5] P.V. Gubarev, D.V. Glazunov and I.A. Yaitskov, *Nadezhnost' podvizhnogo sostava [Reliability of rolling stock]*. Rostov-on-Don: RSTU, 2021 (in Russian).
- [6] M.Yu. Vdovenko, M.D. Zotov, V.A. Melnikov, “The device for recording traction motor telemetry data: prerequisites for creation and features of diagnostics”, *Bulletin of the Institute for Natural Monopolies Problems: Railway Engineering*, vol. 1, no. 57, pp. 31-37, 2022.
- [7] V.V. Burchenkov, *Avtomatizatsiya tekhnicheskogo kontrolya i diagnostiki podvizhnogo sostava zheleznih dorog [Automation technical control and diagnostics of railway rolling stock]*. Gomel: BSUT, 2020 (in Russian).
- [8] I.K. Lakin and V.A. Melnikov, “Organizatsiya remonta teplovozov po diagnosticheskim dannym sovremennyh MSU [Organization of repair of diesel locomotives according to diagnostic data of modern MSUs]”, in proc. *Sovremennye problemy zheleznodorozhnogo transporta [Modern problems of railway transport]*, Mar. 21-22, 2019, Moscow, Russia, vol. 1, pp. 32-39 (in Russian).
- [9] I.S. Tsikhalevsky and A.G. Rusakov, “A key indicator of the new business process of the organization of operation and repair as a tool for monitoring the technical condition of locomotives”, *Herald of the Ural State University of Railway Transport*, vol. 1, no. 49, pp. 40-45, 2021. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-1-40-45
- [10] A.P. Semenov, “*Model' upravleniya zhiznennym ciklom lokomotivov s ispol'zovaniem sovremennyh metodov tekhnicheskogo diagnostirovaniya [A model for managing the life cycle of locomotives using modern methods of technical diagnostics]*”, *Doct. of Tech. S. thesis*, MIIT, Moscow, Russia, 2022 (in Russian).
- [11] V.N. Znayenok, A.O. Linkov and O.V. Melnichenko, “Rectifier-inverter converter of an electric locomotive based on IGBT transistors as a way to increase the capacity of railway sections”, *Journal of Transsib Railway Studies*, vol. 1, no. 45, pp. 66-75, 2021.
- [12] I.Yu. Khromov, “*Analiz vliyaniya rezhimov ekspluatatsii na tekhnicheskoe sostoyaniye lokomotivov [Analysis of the influence of operating modes on the technical condition of locomotives]*”, *Cand. of Tech. S. thesis*, RUT, Moscow, Russia, 2021 (in Russian).

- [13] *Tekhnologicheskoe i diagnosticheskoe oborudovanie dlya depo [Technological and diagnostic equipment for the depot]*, НИТКД [Online]. Available at: [www.nitkd.com](http://www.nitkd.com) [Accessed: Jul. 28, 2024] (in Russian).
- [14] V.G. Matyukhin, *Iskusstvennyj intellekt transporta (ISUZHT) [Artificial Intelligence of transport (AITS)]* [Online]. Available at: <http://www.vniias.ru/images/img/ISUZHT/pdf/2019.pdf> [Accessed: Jul. 28, 2024] (in Russian).
- [15] A.P. Semenov, V.V. Semchenko, I.K. Lakin, “Perspektivy razvitiya cifrovyyh tekhnologiy v servisnyh remontnyh lokomotivnyh depo [Prospects for the development of digital technologies in service repair locomotive depots]”, *Lokomotiv*, no. 11, pp. 2-5, Nov. 2020 (in Russian).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Рыжова Елена Львовна**, кандидат технических наук, доцент Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

**Elena L. Ryzhova**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, St. Petersburg, Russian Federation.

**Осипов Владислав Юрьевич**, ведущий технолог эксплуатационного локомотивного депо Саратов – Пассажирское – структурного подразделения Приволжской дирекции тяги структурного подразделения Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД», г. Саратов, Российская Федерация.

**Vladislav Yu. Osipov**, leading technologist of the Saratov – Passenger Operational Locomotive Depot – structural subdivision of the Volga Traction Directorate of the structural subdivision of the Traction Directorate – branch of JSC Russian Railways, Saratov, Russian Federation

УДК 62-83:62-55+004.032.26

EDN DOTKPK

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

**Я.К. Старостина**

ORCID: 0000-0003-2064-0067 e-mail: yaroslava.starostina@bk.ru

Ульяновский государственный технический университет

*Ульяновск, Россия***А.Д. Токарев**

ORCID: 0009-0003-4195-9859 e-mail: andreyka\_tokarev\_96@mail.ru

Ульяновский государственный технический университет

*Ульяновск, Россия***Д.Д. Поснов**

ORCID: 0009-0004-7037-7986 e-mail: danila\_posnov@mail.ru

Ульяновский государственный технический университет

*Ульяновск, Россия*

Рассматривается важное направление нейронных сетевых технологий – использование нейронных пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов (ПИД-регуляторов). Особое внимание уделяется структурной схеме нейросетевого ПИД-регулятора. Нейронная сеть с использованием ПИД-регуляторов может обеспечить повышение точности регулирования, адаптацию к изменяющимся условиям и быструю реакцию на внешние воздействия. Настройка регуляторов с помощью использования интеллектуальных методов позволит существенно улучшить эффективность и надежность систем управления в различных технических процессах.

**Ключевые слова:** нейросетевой регулятор, ПИД-регулятор, регулятор, система управления, электропривод.

**Для цитирования:** Старостина Я.К., Токарев А.Д., Поснов Д.Д. Использование нейросетевых регуляторов в автоматизированных системах управления электроприводом // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 4. С. 47-57.

EDN DOTKPK

## USE OF NETWORK REGULATORS IN AUTOMATED ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEMS

**Ya.K. Starostina**

ORCID: **0000-0003-2064-0067** e-mail: **yaroslava.starostina@bk.ru**  
Ulyanovsk State Technical University  
*Ulyanovsk, Russia*

**A.D. Tokarev**

ORCID: **0009-0003-4195-9859** e-mail: **andreyka\_tokarev\_96@mail.ru**  
Ulyanovsk State Technical University  
*Ulyanovsk, Russia*

**D.D. Posnov**

ORCID: **0009-0004-7037-7986** e-mail: **danila\_posnov@mail.ru**  
Ulyanovsk State Technical University  
*Ulyanovsk, Russia*

**Abstract.** The article discusses an important area of application of neural networks – the use of neural proportional-integral-differential regulators (PID controller). Special attention is paid to the structural scheme of the neural network PID controller. Neural network using PID controllers can provide an increase in the accuracy of regulation, adaptation to changing conditions and a quick response to external influences. Adjusting regulators using intelligent methods will significantly improve the efficiency and reliability of control systems in various technical processes.

**Keywords:** neural network controller, PID controller, controller, control system, electric drive.

**For citation:** Ya.K. Starostina, A.D. Tokarev and D.D. Posnov, “Use of network regulators in automated electric drive control systems”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 47-57, 2024. EDN DOTKPK

### **I. Введение**

Для развития автоматизированных системы управления (СУ) в настоящее время создается множество различных устройств, обеспечивающих точность, гибкость и простоту функционирования системы.

Целью данного исследования является выявление особенностей работы СУ при использовании нейросетевых регуляторов. Для этого поставлены следующие задачи: рассмотрение и описание структуры нейросетевого регулятора, описание работы нейросетевых регуляторов при ступенчатом и синусоидальном входных сигналах, предоставление соответствующих выводов проведенного исследования.

## II. Нейросетевой регулятор

Регулятор на основе нейросети представляет собой СУ, использующую нейронные сети для принятия решений по управлению динамическими системами. Такие регуляторы применяются в сложных системах, где традиционные методы управления могут быть недостаточно эффективными. Основная идея заключается в том, чтобы использовать способность нейронных сетей к обучению и обобщению для моделирования и управления объектом.

Нейросеть представляет собой математическую модель, составленную из огромного количества искусственных нейронов, объединенных взаимосвязями, аналогичными связям между нервными клетками в организмах животных и людей [1]. Задачей нейросети является преобразование информации в наиболее удачный формат (текстовый, сигнальный, визуальный и т.д.), обеспечивающий удобство дальнейшей обработки оператором. Для этого сеть предварительно проходит процесс обучения. В процессе обучения используются эталонные значения пар, по которым можно оценить поведение используемой нейронной сети [2].

Огромным недостатком современных нейрорегуляторов является нехватка обоснованной методики синтеза, которая гарантирует устойчивость замкнутой системы [3].

Нейрорегулятор (рис. 1) используется при управлении производственной операцией, выполняя расчеты. Он приведен в качестве комплекса, состоящего из нескольких блоков (1 – объект управления, 2 – блок первичной переработки данных, 3 – блок ввода/вывода данных, 4 – задание оператора; 5 – блок реализации алгоритмов ПИД-регулирования, 6 – блок многопараметрического управления, 7 – блок истории работы системы, 7-1 – блок сбора параметров работы объекта управления, 7-2 – блок формирования рабочих массивов, 7-3 – блок формулы коэффициента эффективности, 7-4 – блок сбора значений коэффициента эффективности, 8 – блок интеллектуального классификатора, 9 – блок моделирования, 10 – блок управления, 11 – блок поступления данных с лаборатории, 12 – блок выбора способа управления).

Компонент первичной обработки информации 2 используется для преобразования входных данных с объекта управления в формат, удобный для восприятия пользователем. Компонент ввода и вывода информации 3, служит для взаимодействия системы с пользователем. Компонент реализации 5 необходим для осуществления процесса ПИД-регулирования, в котором происходит формирование единичного управляющего воздействия на исполнительный механизм, на основе оценки показаний единичного датчика.

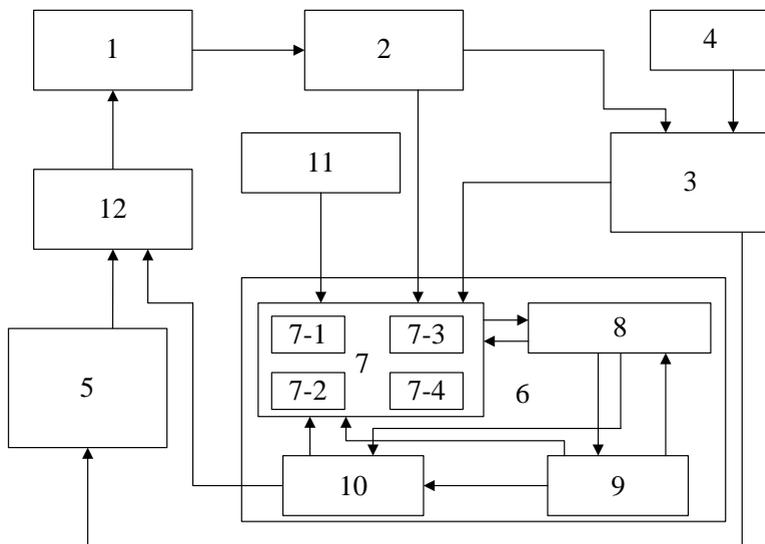


Рис. 1. Структура нейрорегулятора

Fig. 1. Structure of neuroregulator

Компонент управления 6 включает в себя блок истории 7, в который входят блок 7-1 сбора данных работы объекта управления, блок 7-2, который обрабатывает рабочий массив, блок 7-3 коэффициента эффективности и блок 7-4 сбора значений этих коэффициентов. Этот блок необходим для сбора информации о работе системы и создания выборок, а также для реализации расчета коэффициента эффективности, который представляет собой среднеквадратичную ошибку (*Mean Squared Error, MSE*).

Компонент классификации данных 8 создает наборы информации с целью их последующей передачи на различные узлы регулятора, кроме того, обеспечивает оценку процесса принятия решений, на основе используемых нейросетевых алгоритмов. Постановка задачи управления сведена к минимизации среднеквадратичной ошибки между заданными показателями управления и выходным результатом с нейросетевого регулятора, то есть оценка принятия решений управлением системой сводится к задаче теории оптимизации. Оптимизация управления происходит по технологическим параметрам (частоте вращения, углу поворота и т.д.) с помощью алгоритма градиентного спуска.

Компонент анализа 9 осуществляет оценку текущего состояния управляемого объекта при применении определенного алгоритма управле-

ния. Оценка текущего состояния управляемого объекта основана на проведении моделирования выбранной стратегии управления и текущих технологических параметров объекта управления, переданных с блока 8 в виде сформированного и обработанного массива данных.

Компонент управления 10 является формирователем требуемого управляющего сигнала. Компонент управления 12 отвечает за оптимизацию стратегий достижения целей управления, кроме того, на основе результатов моделирования с блока 9 принимает решение о выборе оптимального закона регулирования, либо пропорционально-интегрально-дифференциальный, либо многопараметрический [3].

### III. ПИД-регулятор нечеткого самонастраивающегося типа

ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциальный) и ПИ (пропорционально-интегральный) регуляторы часто встречаются в СУ электроприводами. Использование нейронных сетей совместно с ПИД- и ПИ-регуляторами позволяют адаптировать необходимые параметры под всевозможные условия работы. Нейронные сети имеют важную способность к самообучению и подстройки параметров функционирования СУ. Для снижения нелинейного воздействия на функционирование двигателя постоянного тока имеет смысл использовать самонастраивающийся нечеткий регулятор с ПИД структурой [4]. Схема СУ с использованием ПИД-регулятора нечеткого самонастраивающегося типа приведена на рис. 2.

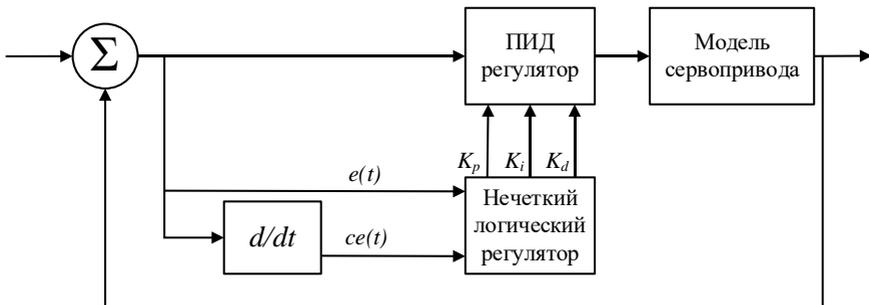


Рис. 2. СУ с содержанием ПИД-регулятора нечеткого самонастраивающегося типа

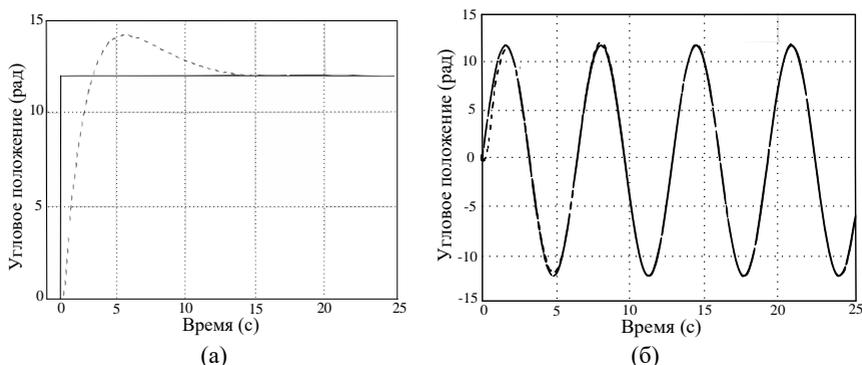
Fig. 2. Control system containing a fuzzy self-tuning PID controller

С целью проектирования регулятора нечеткого логического типа выбраны функции принадлежности входных и выходных переменных. Помимо этого, была сгенерирована база, которая содержит ряд правил типа «если...то». Входные и выходные переменные являются стандартными уни-

версумами, что позволяет избежать дополнительных ошибок в случае определения краевых точек универсума для каждого параметра на входе. При этом под понятием стандартный универсум будем иметь в виду универсум  $[-1, 1]$ . При использовании стандартного универсума необходимо внести изменения в СУ, которая включает в себя регулятор нечеткой логики, требуемый для преобразования выходных данных используемого регулятора.

Основной трудностью при создании такой системы является определение интервала изменения параметров используемого регулятора. Предлагается при проектировании самонастраивающегося ПИД-регулятора для классической его составляющей получить данные основанные на анализе частотной передаточной функции объекта управления и желаемой логарифмической амплитудно-частотной характеристики СУ, а базу знаний нечеткой составляющей формировать в пределах этих данных.

Поведение такого вида ПИД-регулятора при воздействии различных типов сигналов представлена на рис. 3.



**Рис. 3. Реакция адаптивного нечеткого регулятора на: входной ступенчатый сигнал (а) и синусоидальный входной сигнал (б)**

**Fig. 3. Adaptive fuzzy controller response to input step signal (a) and sinusoidal input (b)**

В соответствии с рис. 3,а основные характеристика качества переходного процесса имеют следующие значения: перерегулирование  $\sigma = 20,8 \%$ ; время регулирования  $t_{\text{ин}} = 12,5$  с.; ошибка регулирования  $\xi = 0,008$ . Для сравнения ПИД-регуляторов разных типов, рассмотренных в данной статье, при моделировании был использован ступенчатый входной сигнал 12 вольт, что является максимальным напряжением для сервопривода (рис. 2).

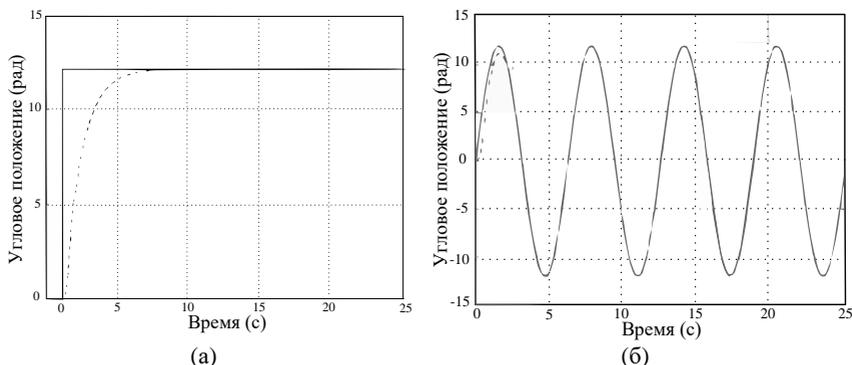
На рис. 3,б приведен график изменения положения сервопривода в зависимости от сигнала задания синусоидальной формы (сплошная линия – желаемая форма выходного сигнала изменения угла положения, штрих-

пунктирная – при использовании в СУ самонастраивающегося ПИД-регулятора). Данный сигнал (штрихпунктирная линия) был получен с выхода самонастраивающегося ПИД-регулятора (рис. 2) для оценки его работы, а именно – для проверки принципа адаптивности и самонастройки на основе правильности формирования базы знаний нечеткого логического регулятора.

Согласно представленным иллюстрациям, применение данных регуляторов неспособно предоставить возможность полностью и эффективно справиться с нелинейными воздействиями на двигатель постоянного тока. Большое значение перерегулирования для данного регулятора является отрицательным фактором. Нейросетевое управление и соответствующие алгоритмы управления должны исправить данную ситуацию, тем самым повысив качество управляющего процесса. При этом обучающими данными для нейросетевого ПИД-регулятора будут являться параметры классического ПИД-регулятора, а проверочными – данные с нечеткого логического регулятора.

#### IV. Нейросетевой ПИД-регулятор

В большом количестве работ затрагивается вопрос создания и улучшения качества управляющего процесса с использованием таких регуляторов [5-7]. Однако, в таком случае обеспечение желаемой точности обучения не предоставляется возможным. В качестве способа создания модели нейросетевого ПИД-регулятора был использован соответствующий инструмент *Neural Network Fitting Tool* в программе *Matlab*. Данный алгоритм позволит рассчитать ошибку, которая возникает в выходном слое, а также определить вектор градиента как функцию смещений и весов. В качестве цели используемого алгоритма стоит отметить настройку весовых коэффициентов нейросети, таким образом, чтобы при подаче на вход нейросети вектора входных значений позволило получить требуемый вектор выходных значений. Считается, что в процессе обучения нейросети каждый вектор входа будет соответствовать требуемому вектору выхода. В пространстве программного обеспечения *Matlab* расписаны входные и выходные данные используемого ПИД-регулятора и представлены в виде двумерных матриц [8]. Обученная нейросеть позволяет формировать управляющие воздействия в зависимости от требуемых входных значений, которые сформируют требуемое состояние управляемого объекта (рис. 4). После проведения процесса обучения нейросеть имеет название нейроэмулятора [9].



**Рис. 4. Реакция нейросетевого регулятора на: входной ступенчатый сигнал (а) и синусоидальный входной сигнал (б)**

**Fig. 4. Neural network regulator response to input step signal (a) and sinusoidal input (b)**

В соответствии с рис. 4,а, основные характеристика качества переходного процесса имеют следующие значения: перерегулирование  $\sigma = 0\%$ ; время переходного процесса  $t_{\text{пн}} = 8$  с; ошибка регулирования  $\xi = 0,001$ . Как видно из характеристик переходного процесса, ПИД-регулятор, настроенный с помощью нейросети, имеет наименьшие величины по сравнению с аналогичными, полученными при применении регулятора нечеткого самонастраивающегося типа, что повышает качество переходного процесса.

На рис. 4,б приведен график изменения положения сервопривода в зависимости от сигнала задания синусоидальной формы (сплошная линия – желаемая форма выходного сигнала изменения угла положения, штрихпунктирная – при использовании в СУ нейросетевого ПИД-регулятора). Данный результат подтверждает, что нейросетевой ПИД-регулятор позволяет добиться высокой точности воспроизведения задающего воздействия и ослабить влияние нелинейностей сервопривода. При этом важно отметить, что на такую точность влияет не только процесс обучения (количество эпох, функции активации, весовые коэффициенты и т.д.), но и архитектура нейросети (тип нейросети, количество внутренних слоев и количество нейронов на каждом из них). При моделировании исследуемого нейросетевого ПИД-регулятора обучение нейросети осуществлялось путем подачи сигналов различных амплитуд в диапазоне частот 0,5-2,5 рад/с.

Полученные результаты моделирования указывают на то, что нейросетевой ПИД-регулятор может быть использован в различных СУ управления электродвигателями. При этом для обеспечения требуемой точ-

ности и достижения лучших качественных показателей работы электропривода, нейросетевую составляющую ПИД-регулятора обучить нелинейным статическим и динамическим характеристикам объекта управления.

Нейросетевое управление позволяет решать огромный спектр задач, начиная от управления и заканчивая распознаванием речи, образов и др. [10]. Сейчас установлено, что искусственные нейронные сети, обладающие большим потенциалом и эффективностью, которые позволяют достигнуть огромных результатов в работе СУ [11].

### **V. Заключение**

Настройка регуляторов с помощью использования интеллектуальных методов позволит снизить влияние нелинейных воздействий на работу используемой СУ. СУ с регуляторами на основе обученных нейронных сетей демонстрируют высокую точность при работе с гармоническим сигналом различной частоты, что в целом улучшает функционирование систем в целом. Применение нейросетевого регулятора в автоматической СУ существенно повышает качество и скорость переходных процессов. Кроме того, такой регулятор адаптируется под различные режимы работы, способствует улучшению энергоэффективности и повышению надежности технического процесса. В результате нейросетевой регулятор становится ценным инструментом в современной инженерной практике и промышленности.

© Старостина Я.К., 2024

© Токарев А.Д., 2024

© Поснов Д.Д., 2024

*Поступила в редакцию 20.06.2024*

*Принята к публикации 28.08.2024*

*Received 20.06.2024*

*Accepted 28.08.2024*

### **Библиографический список**

- [1] Бойматов И.А., Бойматов А.А., Рузаева Н.А. Разработка и внедрение нейросетевого регулятора в систему автоматизации блочной кустовой насосной станции (БКНС) // Межд. науч.-практ. конф. «Новые информационные технологии и системы в решении задач инновационного развития», Май 27, 2021, Казань, Россия. Казань: ООО «Омега Сайнс», 2021. С. 9-12.
- [2] Билинский Ю.А. Синтез нейросетевого регулятора для управления режимом работы погружного двигателя // Межд. науч.-практ. конф. «Новые технологии – нефтегазовому региону», Май 16-20, 2016, Тюмень, Россия. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2016. С. 17-20.
- [3] Хапкин Д.Л., Феофилов С.В., Козырь А.В. Синтез нейросетевых регуляторов с гарантией устойчивости и качества переходного процесса //15-я Межд. науч.-

- тех. конф. «Приборостроение-2022», Ноябрь 16-18, 2022, Минск, Беларусь: БНТУ, 2022. С. 122-124.
- [4] Котелева Н.И., Васильева Н.В. Нейросетевой регулятор для управления сложным технологическим процессом // Записки Горного института. 2013. Т. 202. С. 254-256.
- [5] Жилов Р.А. Постройка ПИД-регулятора с использованием нейронных сетей // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 5 (109). С. 38-47. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-38-47
- [6] Lyshevski S.E. Nonlinear control of mechatronic systems with permanent-magnet DC motors // *Mechatronics*. 1999. № 9 (5). P. 539-552. DOI: 10.1016/S0957-4158(99)00014-8
- [7] Ezema E.E., Eneh I.I. Improving the functional limitations of DC motor using neural network controller // *International journal of Computer technology and electronics engineering (IJCTEE)*. 2013. № 3 (5).
- [8] Бобиков А.И., Бозванов А.О. Нейросетевое управление угловым положением двигателя постоянного тока // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 57. С. 139-144. DOI: 10.21667/1995-4565-2016-57-3-139-144
- [9] Поснов Д.Д., Токарев А.Д. Структура и особенности управления нейрорегуляторами // III Всерос. с межд. уч. молодежной конф. «Бутаковские чтения», Декабрь 12-14, 2023, Томск, Россия: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. С. 152-154.
- [10] Шнипагин В.И. Нейросетевая реализация регулятора для устойчивого объекта // Сборник научных трудов Новосибирского Государственного Технического Университета. 2019. № 3-4 (96). С. 53-63. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-53-63
- [11] Феofilов С.В., Хапкин Д.Л. Базовый синтез нейросетевых регуляторов для следящих систем управления // Известия Тульского Государственного Университета. Технические науки. 2020. № 11. С. 256-261.

## References

- [1] I.A. Boimatov, A.A. Boimatov and N.A. Ruzaeva, “Razrabotka i vnedrenie nejrosetevogo regulatora v sistemu avtomatizacii blochnoj kustovoj nasosnoj stancii (BKNS) [Development and implementation of a neural network regulator in the automation system of a block cluster pumping station (BKNS)]”, in proc. *Int. sci.-pract. conf. “Novye informacionnye tekhnologii i sistemy v reshenii zadach innovacionnogo razvitiya [New information technologies and systems in solving problems of innovative development]”*, May 27, 2021, Kazan, Russia, pp. 9-12 (in Russian).
- [2] Yu.A. Bilinsky, “Sintez nejrosetevogo regulatora dlya upravleniya rezhimom raboty pogruzhnogo dvigatelya [Synthesis of a neural network regulator for controlling the operating mode of a submersible engine]”, in proc. *Int. sci.-pract. conf. “Novye tekhnologii – neftegazovomu region [New technologies - to the oil and gas region]”*, May 16-20, 2016, Tyumen, Russia, pp. 17-20 (in Russian).
- [3] D.L. Khapkin, S.V. Feofilov and A.V. Kozyr, “Synthesis of neural network regulators with guarantee of stability and quality of the transition process”, in proc. *15th Int. sci.-*

- tech. conf. "Instrumentation engineering-2022", Nov. 16-18, 2022, Minsk, Belarus, pp. 122-124.
- [4] N.I. Koteleva and N.V. Vasilyeva, "Neuronet controller design for complex technological processes", *Journal of Mining Institute*, vol. 202, pp. 254-256, 2013.
- [5] R.A. Zhilov, "Building a PID controller using neural networks", *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*, vol. 5, no. 109, pp. 38-47, 2022. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-38-47
- [6] S.E. Lyshevski, "Nonlinear control of mechatronic systems with permanent-magnet DC motors", *Mechatronics*, vol. 9, no. 5, pp. 539-552, Aug. 1999. DOI: 10.1016/S0957-4158(99)00014-8
- [7] E.E. Ezema and I.I. Eneh, "Improving the functional limitations of DC motor using neural network controller", *International journal of Computer technology and electronics engineering (IJCTEE)*, vol. 3, no. 5, Oct. 2013.
- [8] A.I. Bobikov and A.O. Bozvanov, "Neural network position control of DC motor", *Vestnik of Ryazan state radio engineering university*, no. 57, pp. 139-144, 2016. DOI: 10.21667/1995-4565-2016-57-3-139-144
- [9] D.D. Posnov and A.D. Tokarev, "Struktura i osobennosti upravleniya nejroregulyatorami [Structure and features of neuroregulator management]", in proc. *III All-Russian with int. academic. youth conf. "Butakovskie chteniya [Butakovskie readings]"*, Dec. 12-14, 2023, Tomsk, Russia, pp. 152-154 (in Russian).
- [10] V.I. Shipagin, "Neural network implementation of a controller for a stable object", *Transaction of Scientific Papers of the Novosibirsk State Technical University*, vol. 3-4, no. 96, pp. 53-63, 2019. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-53-63
- [11] S.V. Feofilov and D.L. Khapkin, "Basic synthesis of neural network regulators for following control systems", *News of Tula State University. Technical Sciences*, no. 11, pp. 256-261, 2020.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Старостина Ярослава Константиновна**, кандидат технических наук, доцент Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Российская Федерация.

**Токарев Андрей Дмитриевич**, магистрант Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Российская Федерация.

**Поснов Данила Дмитриевич**, магистрант Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Российская Федерация.

**Yaroslava K. Starostina**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation.

**Andrey D. Tokarev**, master of the Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation.

**Danila D. Posnov**, master of the Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation

УДК 621.316.9

EDN IFNPPP

## МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ОТ ТОКОВ УТЕЧКИ В ЦЕПЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 36(42) В

**А.И. Белошистов**

ORCID: 0009-0005-7057-2965 e-mail: [BeloshAlex@yandex.ru](mailto:BeloshAlex@yandex.ru)

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного электрооборудования

*Донецк, Россия*

**А.Л. Серов**

ORCID: 0009-0007-9931-7559 e-mail: [jusstus@yandex.ru](mailto:jusstus@yandex.ru)

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного электрооборудования

*Донецк, Россия*

**А.А. Белошистов**

ORCID: 0009-0008-6034-168X e-mail: [alex1950@ro.ru](mailto:alex1950@ro.ru)

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного электрооборудования

*Донецк, Россия*

Разработано микропроцессорное устройство защиты от токов утечки в цепях напряжением 36 (42) В, опасных в отношении воспламенения метано-воздушной среды и пожаров, подключенных к взрывозащищенным коммутационным аппаратам. Устройство встраивается во взрывозащищенные оболочки взрывозащищенных коммутационных аппаратов, шахтных источников питания и трансформаторных подстанций. Это позволяет повысить технический уровень электрооборудования и уровень пожарной безопасности горнорудного предприятия в целом.

**Ключевые слова:** воспламеняющий ток, микропроцессорные устройства защиты, пожарная безопасность, ток утечки, устройства защиты от токов утечки.

**Для цитирования:** Белошистов А.И., Серов А.Л., Белошистов А.А. Микропроцессорное устройство защиты от токов утечки в цепях напряжением 36(42) В // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 4. С. 58-70. EDN: IFNPPP

## MICROPROCESSOR-BASED LEAKAGE CURRENT PROTECTION DEVICE FOR 36(42) V CIRCUITS

**A.I. Beloshistov**

ORCID: **0009-0005-7057-2965** e-mail: **BeloshAlex@yandex.ru**

Research, Design and Technological Institute of Explosion-proof Electrical Equipment  
*Donetsk, Russia*

**A.L. Serov**

ORCID: **0009-0007-9931-7559** e-mail: **jusstus@yandex.ru**

Research, Design and Technological Institute of Explosion-proof Electrical Equipment  
*Donetsk, Russia*

**A.A. Beloshistov**

ORCID: **0009-0008-6034-168X** e-mail: **alex1950@ro.ru**

Research, Design and Technological Institute of Explosion-proof Electrical Equipment  
*Donetsk, Russia*

**Abstract.** A microprocessor-based residual-current device has been developed to protect against leakage currents in 36 (42) V circuits connected to explosion-proof switching devices, which are dangerous in terms of ignition of the methane-air environment and fires. The residual-current device is built into explosion-proof frames of explosion-proof switching devices, mine power supplies and transformer substations. This makes it possible to increase the technical level of electrical equipment and fire safety of the mining enterprise as a whole.

**Keywords:** fire safety, ignition current, microprocessor-based protection devices, leakage current, residual-current device.

**For citation:** A.I. Beloshistov, A.L. Serov and A.A. Beloshistov, "Microprocessor-based leakage current protection device for 36(42) V circuits", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 58-70, 2024. EDN: IFNPPP

### **I. Введение**

Угольная отрасль, являясь одной из ведущих, обеспечивает сырьем черную металлургию, химическую промышленность и энергетику страны. Уголь используют как энергетическое сырье для производства электроэнергии на тепловых электростанциях.

Кабельные сети угольных предприятий, соединяющие электрооборудования, находятся в условиях, требующих постоянного контроля их состояния. Особое внимание уделяется контролю изоляции. Нарушения изоляции могут приводить к их воспламенению из-за теплового нагрева, пожару и последующему взрыву метано-воздушной смеси.

Пожары в подземных выработках угольных предприятий представляют большую опасность из-за быстрого распространения продуктов горения, содержащих ядовитые и вредные газы, которые разносятся вентиляционной струей по выработкам шахты и приводят к отравлению находящихся в шахте людей. Кроме гибели людей, такие пожары приносят большие разрушения, выводя из строя участки, а иногда и целые шахты. В шахтах они также могут сопровождаться взрывами газа или пыли.

Анализ причин аварий показывает, что 20...25 % пожаров происходит по причинам, связанным с эксплуатацией электрооборудования. Это обусловлено тем, что электрооборудование представляет реальную пожарную опасность и его количество на угольных предприятиях с каждым годом увеличивается.

Источники возгорания от теплового проявления электрической энергии возникают как при неисправностях и повреждениях, вызванных механическими причинами, так и под действием окружающей атмосферы. Тепловое действие электрического тока проявляется в виде электрической искры или дуги при коротких замыканиях, что приводит к пробоям изоляции или чрезмерному перегреву участков электрических сетей.

Силовые кабельные участковые сети в угольных шахтах, имеющие уровни напряжения переменного тока от 127 до 1140 В, оснащены аппаратами защиты от утечек тока на землю, которые обеспечивают непрерывный контроль состояния сопротивления изоляции сети [1]. Но имеются случаи, когда причиной аварии стали замыкания на землю в однофазных цепях переменного тока напряжением 42/36 В. Такие аварии произошли на шахте «Красноармейская-Западная № 1» в декабре 2002 г. и на шахте им. С.М. Кирова в мае 2001 г.

Наиболее распространенным потребителем однофазного напряжения 36 В является аппаратура управления и контроля конвейерных линий, в качестве источника питания которых применяются магнитные пускатели, имеющие в своем составе трансформатор с обмоткой, формирующей напряжение 36 В и защищенной только плавким предохранителем. Кроме аппаратуры управления конвейерными линиями, электрические цепи с однофазным напряжением 36 В применяются для питания электрических светильников местного освещения в составе проходческих комбайнов, породопрогрузочных машин и бурильных установок.

В статье представлены результаты разработки серии микропроцессорных устройств защиты от токов утечки в цепях напряжением 36(42) В, предназначенных для защиты выходных цепей, напряжением 36 В с номинальным током нагрузки 9 А и отличающихся применением современных электронных компонентов.

## II. Анализ публикаций и исследований

Существуют разработки устройств защиты от утечек тока в однофазной цепи источника переменного тока напряжением 36/42 В: АУЗТ (ЗАО «МЗША»), блок реле утечки БРУТ (ООО «ГЭТЗ-Инвест»), а также БЗ-2. Данные устройства в основном являются аналоговыми и содержат электролитические конденсаторы, формирующие режимы работы устройства в целом. Учитывая, что они функционируют в условиях повышенной температуры, параметры электролитических конденсаторов со временем меняются, что приводит к изменению параметров всего устройства. В [1] установлено, что в цепи переменного тока напряжением 36 В воспламеняющий ток при индуктивности цепи  $10^{-3}$  Гн снижается до значения 0,1 А, а при индуктивности 1 Гн – до 0,04 А.

На основе полученных результатов были установлены технические характеристики аппарата защиты от утечек тока в однофазных сетях переменного тока напряжением 36(42) В (табл. 1).

**Таблица 1.**  
**Технические характеристики аппарата защиты**

**Table 1.**  
**Technical characteristics of the protection device**

№	Наименование характеристики	Значение
1	Допустимое отклонение напряжения питания от номинального, %	-15...+10
2	Время срабатывания аппарата защиты, с, не более	0,1
3	Сопrotивление однофазной утечки на землю, при котором срабатывает защита, кОм, не менее	3,5

Приведенные технические характеристики были учтены при проектировании микропроцессорного устройства защиты от токов утечки в цепях напряжением 36(42) В [3, 4].

В настоящее время для предварительного контроля изоляции, защиты от утечек тока на землю и коротких замыканий в цепях напряжением 36 В, подключенных к взрывозащищенным коммутационным аппаратам и опасных в отношении воспламенения метано-воздушной среды и пожаров, на угольных предприятиях применяются блоки БЗ-2 и БЗ-2МК [5]. Блоки служат для встройки во взрывозащищенные оболочки пускателей, комплектных устройств управления, трансформаторных подстанций и других аппаратов, в которых предусматривается вывод напряжения 36 В для питания внешних токоприемников. Блоки БЗ-2 и БЗ-2МК имеют идентичные технические характеристики и конструкцию. Они предназначены для коммутации цепей напряжением 36 В, при  $\cos\varphi = 0,6$ , не более 2 А, что ограничивает зону их применения.

Для контроля выходных цепей шахтных источников питания с номинальным током потребления выходных цепей более 3 А и напряжением 36(42) В необходим блок с соответствующей коммутационной способностью и соответствующим алгоритмом работы.

### III. Результаты разработки

При разработке источника питания для нужд угольной промышленности мощностью 6 кВА возник вопрос защиты выходных цепей напряжением 36 В с номинальным током нагрузки 9 А. Для этой цели было разработано микропроцессорное устройства защиты от токов утечки РУ-36И [6-9]. На его основе для замены отработавших свой ресурс блоков типа БЗ-2 разработаны блоки защиты типа РУ-36 и РУ 36/42.

Микропроцессорное устройства защиты от токов утечки РУ-36И предназначено для защиты от токов утечек на землю и предварительного контроля изоляции, опасных в отношении воспламенения метано-воздушной среды и пожаров цепей напряжением 36 В, подключенных к взрывозащищенным источникам питания и коммутационным аппаратам. Блок встраивается во взрывозащищенные оболочки шахтных источников питания, трансформаторных подстанций и других аппаратов, в которых предусматривается вывод напряжения 36 В для питания внешних токоприемников.

Устройство предназначено для эксплуатации при условиях:

- климатическое исполнение – УХЛ [10];
- номинальные значения климатических факторов:
- верхнее значение температуры окружающего воздуха – 60 °С;
- верхнее значение относительная влажность воздуха (98±2) % (с конденсацией влаги) при температуре (35±2) °С;
- номинальные значения механических внешних воздействующих факторов – по ГОСТ 17516.1 для группы механического исполнения М1 [11].

Основные технические характеристики микропроцессорного устройства защиты от токов утечки РУ-36И приведены в табл. 2.

Блок состоит из пластмассового корпуса, на основании которого крепится печатная плата с электронными элементами и имеется ключ для безошибочной установки блока на свое место в аппарате. После установки блок крепится винтом.

Питание блока осуществляется от трансформатора собственных нужд коммутационного или распределительного устройства.

**Таблица 2.**  
**Основные параметры устройства защиты РУ-36И**

**Table 2.**  
**Main parameters of the protection device RU-36I**

Наименование основных параметров	Значение
Номинальное напряжение питания, В	15
Номинальное напряжение защищаемой сети, В	36
Потребляемая мощность, В·А, не более	8
Сопротивление срабатывания при симметричной трехфазной утечке, кОм на фазу, не менее	7
Сопротивление срабатывания при однофазной утечке, кОм, не менее	3,5
Емкость сети, мкФ на фазу	0...0,15
Собственное время срабатывания блока при сопротивлении однофазной утечки 1,0 кОм и емкости сети от 0 до 0,15 мкФ на фазу, с, не более	0,1
Сопротивление срабатывания в режиме предупредительного контроля изоляции, кОм, не менее	4,2
Сопротивление автоматической деблокировки в режиме блокировочного реле утечки, от сопротивления срабатывания, %, не более	150
Масса устройства, кг, не более	0,31

Принципиальная электрическая схема устройства защиты РУ-36И приведена на рис. 1.

Электрическая схема устройства обеспечивает:

- предварительный контроль сопротивления изоляции и подачу напряжения на контролируемое присоединение;
- непрерывный контроль сопротивления изоляции присоединения под рабочим напряжением и защиту от токов утечек на землю;
- световую сигнализацию о срабатывании исполнительного реле при снижении сопротивления изоляции контролируемой цепи ниже допустимого значения.

Микропроцессорное устройство защиты от токов утечки РУ-36И выходных цепей напряжением 36 В состоит из:

- измерительной схемы, выполненной на микроконтроллере DD1;
- стабилизированного источника питания микроконтроллера - DA1;
- стабилизированного источника питания, выполненного на транзисторе VT4, стабилитроне VD8;
- источника оперативного напряжения на диоде VD6, конденсаторе C5;
- источника опорного напряжения на диоде VD5, конденсаторе C2;

- фильтра низких частот (ФНЧ), выполненного на резисторах R2, R3, и конденсаторах C1, C3;
- развязывающих диодов VD1-VD2, при помощи которых вход измерительного органа подключается к защищаемой сети;
- исполнительного органа на базе реле K1.

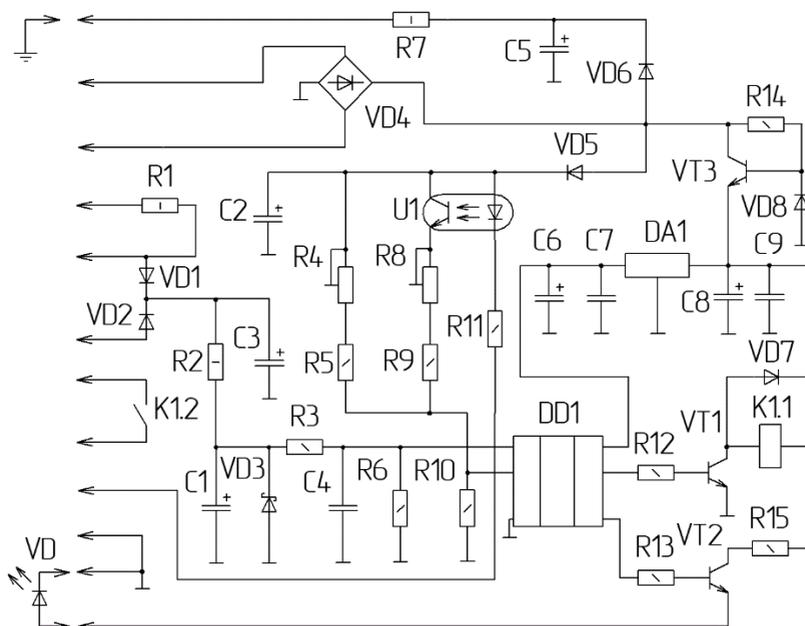


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема устройства защиты РУ-36И

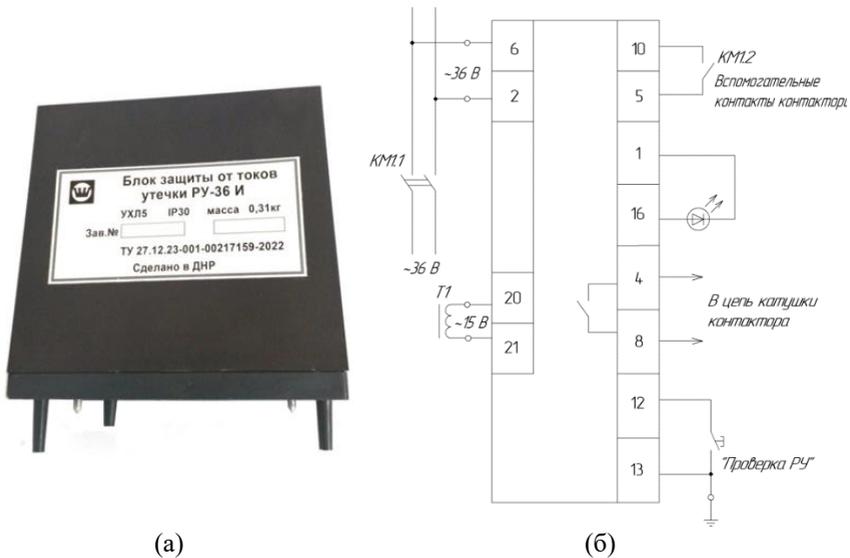
Fig. 1. Electrical schematic diagram of the RU-36I protection device

Порядок работы устройства РУ-36И следующий. При подаче напряжения на коммутационный аппарат со встроенным устройством напряжение на выводы 36 В подается после предварительного контроля состояния сопротивления изоляции сети. Если сопротивление изоляции находится в допустимых правилами безопасности пределах, то по истечении времени выдержки порядка 1-3 сек произойдет включение исполнительного реле и отключение световой сигнализации. Исполнительное реле замыкает цепь управления. При помощи поста управления осуществляется подача напряжения 36 В на выводы коммутационного аппарата.

При неудовлетворительном состоянии изоляции включения исполнительного реле не произойдет, и световая сигнализация по истечению выдержки времени не отключится.

Измерение сопротивления изоляции сети под напряжением происходит при помощи оперативного тока, протекающего по цепи: источник оперативного тока (VD6, C5, R7), сопротивление изоляции сети, фильтр нижних частот (C1-R2, C4-R3, R6). С резистора R6 выходной сигнал, пропорциональный сопротивлению изоляции контролируемой сети, подается на вход GP1 (вывод 6) измерительной схемы, выполненной на микроконтроллере DD1. На вход GP0 (вывод 7) микроконтроллера через делитель (R4, R5, R8 – R10) подается опорное напряжение от источника VD5, C2. Если значение входного сигнала превышает значение опорного сигнала, выдается сигнал на отключение исполнительного реле.

Общий вид микропроцессорного устройства защиты РУ-36И, а также схема его внешних соединений представлены на рис. 2 и рис. 3 соответственно.



(а) (б)  
**Рис. 2. Устройство защиты РУ-36И:**  
 общий вид (а); схема внешних соединений (б)

**Fig. 2. RU-36I protection device:**  
 general view (a); external connection diagram (b)

#### IV. Исследования и испытания

Лабораторным испытаниям был подвергнут опытный образец устройства защиты от токов утечки РУ-36И на напряжение 36 В. В результате были получены следующие данные.

Определены сопротивления срабатывания при однофазной и симметричной утечках, длительные токи утечки и измерительный ток при значениях напряжения равных 0,85; 1,0 и 1,1 от номинального напряжения сети, и различных емкостях сети (табл. 3).

**Таблица 3.**  
Сопротивления срабатывания при однофазной и симметричной утечках, длительные токи утечки и измерительный ток

**Table 3.**  
Single-phase and symmetrical leakage actuation resistances, continuous leakage currents and measuring current

Напряжение сети $U$ , В	$C_{\text{сети}}$ , мкФ на фазу	$R_1$ , кОм	$I_{\text{дл}}$ , мА	$R_2$ , кОм	Измерительный ток $I_{\text{изм}}$ мА
36	0	3	5,4	6	5,5
	0,15	3	6,2	-	-
39,6	0	2,7	6,25	-	-
	0,15	2,7	6,75	-	-
30,6	0	2,9	4	-	-
	0,15	2,9	4,25	-	-

Определены величины сопротивления срабатывания в режиме БРУ (блокировочное реле утечки) при номинальном напряжении сети и емкости сети, равной нулю (табл. 4).

**Таблица 4.**  
Сопротивления срабатывания в режиме БРУ

**Table 4.**  
Actuation resistance in BRU mode

Напряжение сети, В	Сопротивление срабатывания в режиме БРУ, кОм на фазу	Сопротивление автоматической деблокировки, кОм на фазу
36	4,2	4,3

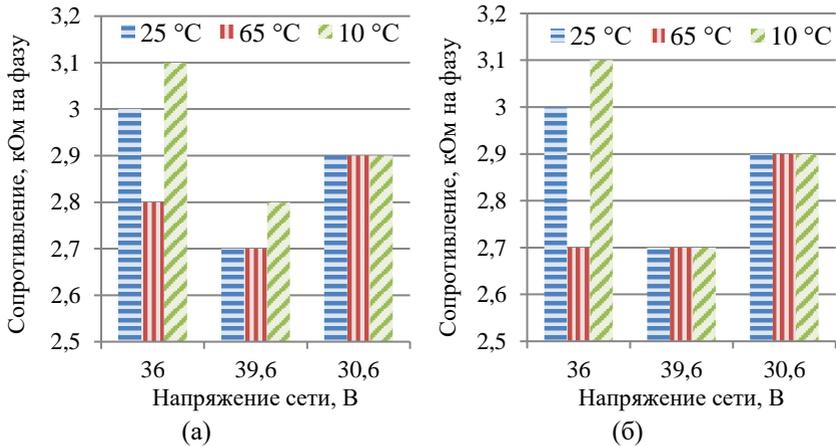
Определено собственное время срабатывания при создании однофазной утечки сопротивлением 1000 Ом, номинальном напряжении сети, бесконечно большом сопротивлении изоляции и емкости сети, равной 0 и 0,15 мкФ с использованием контактов выходного реле (табл. 5).

Диаграммы изменения сопротивления срабатывания микропроцессорного устройства защиты РУ-36И в зависимости от изменения температуры окружающей среды при различных величинах питающего напряжения приведены на рис. 3.

**Таблица 5.**  
Собственное время срабатывания

**Table 5.**  
Intrinsic actuation time

$U_{\text{сети}},$ В	$C_{\text{сети}},$ мкФ на фазу	№ опыта и время срабатывания аппарата защиты, мс									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
36	0	55,5	49,5	47,9	55,6	56,7	66,4	45,2	58,8	45,3	42,7
	0,15	62,2	48,3	56,2	65,6	58,5	55,0	48,4	52,2	65,2	52,7



**Рис. 3.** Диаграмма сопротивления срабатывания блока при емкости сети 0 мкФ (а) и 0,15 мкФ (б)

**Fig. 3.** Device response resistance at the network capacity 0  $\mu\text{F}$  (a) and 0,15  $\mu\text{F}$  (b)

Результаты, полученные в ходе проведения лабораторных испытаний блока, полностью подтвердили заявленные в ходе разработки параметры. Блок соответствует требованиям ГОСТ 31612-2012 «Устройства защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В» и обеспечивает стабильность параметров защитных характеристик в заданном интервале изменения температуры окружающего воздуха.

#### **V. Выводы**

Повышение надежности устройств контроля и защиты от тока утечки всегда являлось актуальной задачей.

Применение микроконтроллеров позволяет проектировать устройства с улучшенными техническими и потребительскими характеристиками,

создавать малогабаритные электронные устройства, выполняющие различные функции, обладающее стабильными характеристиками в течении всего срока службы и надежностью защиты. Кроме того, устройства защиты от токов утечки на базе микроконтроллеров обладают более низким энергопотреблением.

Результаты, полученные в ходе разработки данного устройства, могут быть использованы при разработках аналогичных устройств защиты и контроля.

© Белошистов А.И., 2024

© Серов А.Л., 2024

© Белошистов А.А., 2024

*Поступила в редакцию 26.06.2024*

*Принята к публикации 09.07.2024*

*Received 26.06.2024*

*Accepted 09.07.2024*

### **Библиографический список**

- [1] Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 г. N 507 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» // Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012210103?index=1> (дата обращения 23.05.2024).
- [2] Разработать и освоить серийное производство аппаратов защиты от утечек тока на землю в однофазных цепях переменного тока напряжением 42/36 В. Разработать технические характеристики и техническую документацию на макетный образец аппарата защиты от утечек тока на землю в однофазных цепях переменного тока напряжением 42/36 В. Промежуточный отчет по ПНИ. 1710202060. Макеевка-Донбасс: МАКНИИ, 2002.
- [3] ГОСТ 31612-2012. Устройства защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические требования. Введ. 2013-02-15. М.: Стандартинформ, 2013. – 15 с.
- [4] Слесарев А.И., Моисейкин Е.В., Устьянцев Ю.Г. Аспекты проектирования электронных схем на основе микроконтроллеров. Екатеринбург: УрФУ, 2018. – 136 с.
- [5] Блок защиты выходных цепей БЗ–2. Руководство по эксплуатации ПИЖЦ656115.051РЭ.
- [6] Кёнинг А., Кёнинг М. Полное руководство по PIC-микроконтроллерам PIC18, PIC10F, rfPIC. Киев: МК-Пресс, 2007. – 256 с.
- [7] Предко М. PIC-микроконтроллеры: архитектура и программирование. М.: ДМК Пресс, 2010. – 500 с.
- [8] Каган Б.М., Сташин В.В. Основы проектирования микропроцессорных устройств автоматики. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 304 с.

- [9] Горобец А.И. Справочник по конструированию радиоэлектронной аппаратуры (печатные узлы). Киев: Техника, 1985. – 311 с.
- [10] ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. Введ. 1971-01-01. М.: Стандартинформ, 2010. – 71 с.
- [11] ГОСТ 17516.1-90. Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам. Введ. 1991-01-01. М.: Стандартинформ, 2007. – 60 с.

## References

- [1] Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated Dec. 8, 2020 no. 507 “Ob utverzhdenii federal'nyh norm i pravil v oblasti promyshlennoj bezopasnosti “Pravila bezopasnosti v ugol'nyh shahtah” [On approval of federal norms and rules in the field of industrial safety “Safety rules in coal mines”]”, *Official Internet portal of legal information*. [Online]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012210103?index=1> [Accessed: May 23, 2024] (in Russian).
- [2] “Razrabotat' i osvo-it' serijnoe proizvodstvo apparatov zashchity ot utechek toka na zemlyu v odno-faznyh cepyah peremennogo toka napryazheniem 42/36 V. Razrabotat' tekhnicheskie harakteristiki i tekhnicheskuyu dokumentaciyu na maketnyj obrazec aparata zashchity ot utechek toka na zemlyu v odnofaznyh cepyah peremennogo toka napryazheniem 42/36 V [Develop and master serial production of devices for protection against current leaks to the ground in single-phase AC circuits with a voltage of 42/36 V. Develop technical characteristics and technical documentation for a mock-up sample of the device for protection against current leaks to the ground in single-phase AC circuits with a voltage of 42/36 V]”, МАКНИИ, Makeevka-Donbass, Tech. Rep. 1710202060, 2002 (in Russian).
- [3] Explosion-proof mine electromagnetic starters up to 1140 V. Technical requirements and test methods, GOST 31612-2012, Feb. 2013.
- [4] A.I. Slesarev, E.V. Moisejkin and YU.G. Ust'yancev, *Aspekty proektirovaniya elektronnyh skhem na osnove mikrokontrollerov. [Aspects of designing electronic circuits based on microcontrollers]*. Ekaterinburg: UrFU, 2018 (in Russian).
- [5] Blok zashchity vyhodnyh cepej BZ–2. Rukovodstvo po ekspluatatsii [BZ-2 output circuit protection block. Operation manual PIZhC656115.051RE] (in Russian).
- [6] A. Kyoning and M. Kyoning, *Polnoe rukovodstvo po PIC-mikrokontrolleram PIC18, PIC10F, rPIC [Complete guide to PIC microcontrollers PIC18, PIC10F, rPIC]*. Kiev: MK-Press, 2007 (in Russian).
- [7] M. Predko, *PIC-mikrokontrollery: arhitektura i programmirovaniye [PIC microcontrollers: architecture and programming]*. Kiev: DMK Press, 2007 (in Russian).
- [8] B.M. Kagan and V.V. Stashin, *Osnovy proektirovaniya mikroprocessornyh ustrojstv avtomatiki [Microprocessor automation design basis]*. M.: Energoatomizdat, 1987 (in Russian).
- [9] A.I. Gorobec, *Spravochnik po konstruirovaniyu radioelektronnoj apparatury (pechatnye uzly) [Reference book on radio electronic equipment design (printing units)]*. Kiev: Tekhnika, 1985 (in Russian).

- [10] Machines, instruments and other industrial products. Modifications for different climatic regions. Categories, operating, storage and transportation conditions as to environment climatic aspects influence, GOST 15150-69, Jan. 2010.
- [11] Electrical articles. General requirement for environment mechanical stability, GOST 17516.1-90, Jan. 2007.

### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Белошистов Александр Иванович**, заведующий комплексным научно-исследовательским отделом электрических аппаратов ГБУ «НИИВЭ», г. Донецк, ДНР, Российская Федерация. **Aleksandr I. Beloshistov**, head of the integrated research department of electrical devices of the NIIVE, Donetsk, DPR, Russian Federation.

**Серов Андрей Леонидович**, младший научный сотрудник комплексного научно-исследовательского отдела электрических аппаратов ГБУ «НИИВЭ», г. Донецк, ДНР, Российская Федерация. **Andrey L. Serov**, junior researcher of the integrated research department of electrical devices of the NIIVE, Donetsk, DPR, Russian Federation.

**Белошистов Алексей Александрович**, инженер-конструктор комплексного научно-исследовательского отдела электрических аппаратов ГБУ «НИИВЭ», г. Донецк, ДНР, Российская Федерация. **Alexey A. Beloshistov**, design engineer of the integrated research department of electrical devices of the NIIVE, Donetsk, DPR, Russian Federation.

УДК 621.317.444

EDN AГEMCY

## **ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВЫХ МАГНИТОМЕТРОВ В МАГНИТОРАЗВЕДКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ**

**Д.Б. Петленко**

ORCID: 0009-0004-1299-4791 e-mail: dpetlenko@yandex.ru

МИРЭА – Российский технологический университет  
*Москва, Россия***Е.А. Авдонин**

ORCID: 0009-0003-0309-8138 e-mail: avdonin.e.a@edu.mirea.ru

МИРЭА – Российский технологический университет  
*Москва, Россия*

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в настоящее время нашли широкое применение в различных областях человеческой деятельности, в том числе, в области магниторазведки в интересах геологии и археологии. Применение БПЛА для магниторазведки позволяет проводить сканирование и измерение магнитных характеристик земной поверхности в труднодоступных или опасных районах. Часто для этих исследований используются квантовые рубидиевые магнитометры. Описан вариант реализации подобного прибора. Для оценки геологических запасов полезных ископаемых и определения мест их наиболее вероятного расположения, а также расположения исторических памятников необходимо построение магнитной карты местности.

Магниторазведка с применением технологий БПЛА как геофизический метод исследования отличается наиболее высокой производительностью в сравнении с другими методами измерений. Современные измерительные приборы могут быть успешно установлены на промышленные беспилотные аппараты мультироторного типа из-за своих небольших размеров и малого веса (до 1-2 кг). Рассмотрены преимущества использования квантового магнитометра для решения прикладных задач.

**Ключевые слова:** БПЛА, квантовый рубидиевый магнитометр, магнитная карта местности, магниторазведка, методика получения данных магниторазведки.

**Для цитирования:** Петленко Д.Б., Авдонин Е.А. Применение квантовых магнитометров в магниторазведке с использованием беспилотных систем // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 4. С. 71-85. EDN AГEMCY

# APPLICATION OF QUANTUM MAGNETOMETERS IN MAGNETIC EXPLORATION USING UNMANNED SYSTEMS

**D.B. Petlenko**

ORCID: **0009-0004-1299-4791** e-mail: **dpetlenko@yandex.ru**  
MIREA – Russian Technological University  
*Moscow, Russia*

**E.A. Avdonin**

ORCID: **0009-0003-0309-8138** e-mail: **avdonin.e.a@edu.mirea.ru**  
MIREA – Russian Technological University  
*Moscow, Russia*

**Abstract.** Unmanned aerial vehicles (UAVs) are now widely used in various fields of human activity, including magnetic reconnaissance for geology and archaeology. The use of UAVs for magnetic reconnaissance allows scanning and measuring the magnetic characteristics of the earth's surface in areas that are difficult or dangerous to access. Quantum rubidium magnetometers are often used for these studies. The paper describes a variant of realization of such a device. In order to estimate geologic mineral reserves and determine where they are most likely to be found, as well as the location of historical monuments, it is necessary to construct a magnetic map of the area.

Magnetic survey using UAVs as a method of geophysical research is characterized by the highest productivity compared to other measurement methods. Modern measuring devices can be successfully installed on industrial drones of multirotor type due to their small size and low weight (up to 1-2 kg). The article discusses the advantages of using a quantum magnetometer for solving applied problems.

**Keywords:** magnetic exploration, magnetic terrain map, methods of obtaining magnetic exploration data, quantum rubidium magnetometer, UAV.

**For citation:** D.B. Petlenko and E.A. Avdonin, “Application of quantum magnetometers in magnetic exploration using unmanned systems”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 71-85, 2024. EDN AGEMCY

## I. Введение

Активный рост темпов развития технологий проектирования, сборки и эксплуатации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) за последние годы привел к значительному развитию многих направлений человеческой деятельности. В частности, беспилотные летательные аппараты нашли широкое применение в области магниторазведки и геологии.

БПЛА представляют собой автономные электротехнические комплексы, для которых применение каких-либо электроприборов требует решения задач обеспечения их надежного электропитания, снижения потребления электроэнергии, а также вопросов электромагнитной совместимости.

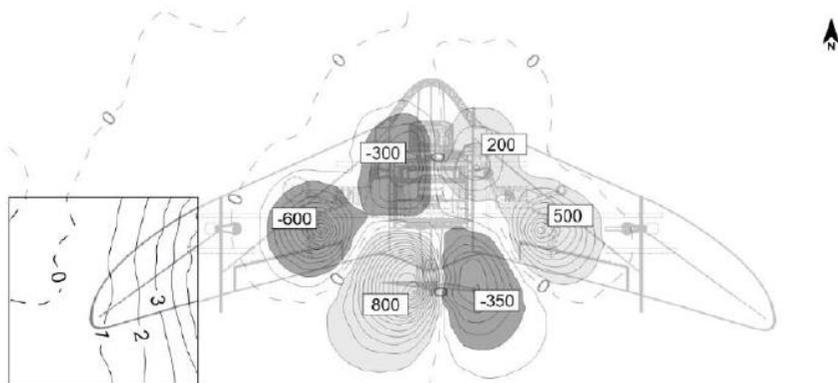
Магниторазведка с использованием беспилотных летательных аппаратов имеет высокую актуальность в области геологии, горнодобывающей промышленности и оборонных технологий [1, 2]. Это связано с возможностью быстрого, точного и масштабного сбора геофизических данных о магнитных полях на больших территориях [3, 4]. Применение БПЛА для магниторазведки позволяет проводить сканирование и измерение магнитных характеристик земной поверхности в труднодоступных или опасных районах, где традиционные методы проведения разведочных работ могут сталкиваться с ограничениями или определенными рисками для человека. Эти данные могут быть использованы для поиска полезных ископаемых или различных техногенных объектов, для определения структуры подземных образований, а также для обеспечения безопасности и контроля над магнитными аномалиями в определенных районах [5]. С появлением компактных квантовых магнитометров открылись широкие перспективы в беспилотной магниторазведке [6]. Разработка квантовых магнитометров позволяет в значительной степени оптимизировать процесс воздушной магниторазведки и повысить ее эффективность. Цель данной работы – изучение и систематизация актуальных прикладных методов получения данных магниторазведки с использованием квантового магнитометра, обсуждение технических аспектов и перспектив рассматриваемых методов аэромагнитной съемки.

Для магниторазведки использование БПЛА актуально, как ни для другого геофизического метода [7, 8]. Современные магнитометры – относительно легкие и малопотребляющие электроэнергию геофизические приборы, которые обеспечивают высокую точность измерения компонент вектора магнитного поля [9]. Это позволяет успешно использовать их на компактных летательных аппаратах. Таким образом, с развитием современных технологий беспилотных систем появилась совершенно новая методика получения данных магниторазведки: маловысотная аэросъемка с БПЛА. Проведение работ по магнитной съемке с помощью БПЛА позволяет значительно ускорить и автоматизировать процесс получения данных и сводит к минимуму человеческий фактор и шанс ошибок измерений, по сравнению, например, с традиционной наземной магниторазведкой [10].

## **II. Влияние магнитного поля БПЛА на проведение измерений**

Магнитометр не может быть установлен непосредственно на сам БПЛА, так как магнитное поле силовой установки, систем управления и навигации самого летательного аппарата будет очень сильно влиять на измерение. В частности, данная проблема была подробно рассмотрена при

проектировании промышленных БПЛА компанией «ГЕОСКАН» [8]. Результаты измерений собственных магнитных полей БПЛА «Геоскан-201» показали наличие сильного магнитного поля (рис. 1). Магнитное поле, создаваемое электродвигателем, системой управления и бортовой электроникой могло достигать нескольких сотен нТл, в то время как характерные ошибки измерений в геофизике лежат в пределах 1-2 нТл.



**Рис. 1. Значения магнитных полей (в нТл), создаваемых бортовой электроникой самолета «Геоскан-201»**

**Fig. 1. Values of magnetic fields (in nTl) generated by the onboard electronics of the Geoscan-201 aircraft**

С появлением беспилотных аппаратов мультироторного типа (квадрокоптеров и гексакоптеров) открылись новые методики проведения измерений магнитного поля. Мультироторные БПЛА обладают возможностью вертикального взлета и посадки, что обеспечивает гибкость в выборе места старта и приземления. Кроме того, промышленные квадрокоптеры могут нести достаточную полезную нагрузку и способны точно огибать рельеф местности, постоянно поддерживая заданную высоту маршрута. Мультироторные БПЛА позволяют повысить точность магниторазведочных работ по сравнению с БПЛА самолетного типа.

Магнитометр подвешивается на тросе к квадрокоптеру на расстоянии нескольких десятков метров [11]. Затем летательный аппарат совершает полет вдоль заданных траекторий над исследуемой местностью. Таким образом, промышленные квадрокоптеры успешно используются в геофизике при построении карт магнитных полей местности и геологоразведке. В беспилотной магниторазведке в настоящее время довольно часто используются квантовые рубидиевые магнитометры.

### III. Принцип работы квантового рубидиевого магнитометра

В квантовых магнитометрах, предназначенных для измерения абсолютных значений модуля индукции магнитного поля, используют эффект Зеемана. В электронной структуре атомов, обладающих магнитным моментом, при попадании в магнитное поле происходит расщепление энергетических уровней на подуровни, с разницей энергии и, соответственно, частотой излучения, пропорциональной модулю полного вектора магнитной индукции в точке наблюдения.

Квантовый рубидиевый магнитометр работает на основе явления квантового поглощения света атомами рубидия, а также других щелочных металлов (цезий *Cs*, натрий *Na*, калий *K*) и инертных газов. Если пары рубидия облучать поляризованным монохроматическим светом, длина волны которого соответствует одной из спектральных линий используемого элемента, то атомы уходят на верхние уровни и через короткое время (быстрее 1 мкс) скапливаются на одном энергетическом подуровне, переходы с которого запрещены. Их магнитные оси будут сориентированы одинаково. В результате появится прецессия электронов относительно геомагнитного поля на частоте Лармора:

$$\omega = \gamma \cdot H,$$

где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение;  $\omega$  – частота Лармора;  $H$  – напряженность магнитного поля.

Используя разные варианты схемотехнической реализации, можно добиться, чтобы колебалась и интенсивность света. Если сигнал с фотоэлемента усилить и подать на катушку, намотанную на колбе с рабочим веществом (пары цезия или рубидия), то можно получить автоподстраиваемый резонансный осциллятор. Измерив его частоту, можно рассчитать величину поля. Таким образом, интенсивность магнитного поля представляется через частоту. При этом изначально непрозрачный пар рабочего вещества – щелочного металла (нерадиоактивный цезий, калий или рубидий), находящийся в герметичной ячейке – электронно-оптическом чувствительном модуле (ЧМ), подвергается облучению (накачке) поляризованным монохроматическим светом, длина волны которого соответствует спектральной линии вещества. Свет поглощается, и атомы, возбуждаясь, переходят со второго на третий энергетический уровень – пар становится прозрачным. Через короткое время (~1 мкс) атомы спонтанно переходят на уровень 1 (полностью его заполняя) и 2 (незаполненный). ВЧ-магнитное дполяризующее поле с частотой  $f$  (обеспечивается соленоидом), соответствующей разнице энергий этих уровней, перемещает электроны с первого уровня ко второму, при этом

пар опять становится менее прозрачным. Происходящая прецессия электронов на частоте Лармора пропорциональна величине окружающего магнитного поля. С этой же частотой изменяется интенсивность света, регистрируемая фотодетектором. Сигнал с фотоэлемента усиливается и подается на соленоид, реализуя автоподстраиваемый ВЧ-осциллятор, резонансная частота которого пропорциональна модулю индукции магнитного поля. Измерительная часть квантового магнитометра по сути представляет собой фотоприемник и высокоточный частотомер, работающий в режиме периодического счета, – чем больше период, тем выше разрешение [12]. Схема конструкции квантового рубидиевого магнитометра показана на рис. 2. Возможный вариант реализации изложен в [13].

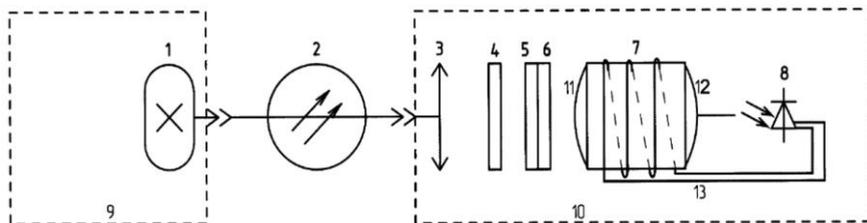


Рис. 2. Вариант конструкции квантового рубидиевого магнитометра

Fig. 2. Design variant of a quantum rubidium magnetometer

Квантовый рубидиевый  $M_z$  аэромагнитометр может включать в себя: 1 – лампу накачки с системой питания и стабилизации температуры, 2 – световод, 3 – собирающую линзу, 4 – интерференционный фильтр, 5 – поляризатор, 6 – четверть-волновую пластинку, 7 – камеру поглощения с системой стабилизации температуры, 8 – фотодиод, 9 – блок электроники, 10 – датчик магниточувствительный, 11 – входную линзу камеры поглощения, 12 – выходную линзу камеры поглощения, 13 – радиочастотную катушку.

Работает устройство следующим образом: свет от лампы накачки, расположенной в блоке электроники, транслируется по световоду в магниточувствительный датчик. Лампа накачки содержит изотоп  $Rb^{87}$ . Свет из световода попадает на линзу в магниточувствительном датчике, которая вместе с входной линзой камеры поглощения формирует пучок света, близкий к параллельному, проходящий через камеру поглощения. Камера поглощения содержит буферный газ  $He$  и изотоп  $Rb^{87}$ . Буферный газ снижает диффузию оптически ориентированных атомов к стенкам камеры поглощения и, таким образом, уменьшает число дезориентирующих соударений, что увеличивает амплитуду сигнала и сужает линию магнитного резонанса. Ин-

терференционный фильтр выделяет из широкого спектра, излучаемого лампой накачки, оптическую линию с длиной волны 7947,47 ангстрем, которая используется для оптической ориентации атомов изотопа  $Rb^{87}$ . Поляризатор выделяет свет с линейной поляризацией. Четвертьволновая пластинка используется для преобразования линейно поляризованного света в циркулярно поляризованный, который несет момент количества движения. При поглощении квантов циркулярно поляризованного света их момент количества движения передается атомам изотопа  $Rb^{87}$ , что приводит к оптической ориентации. Выходная линза камеры поглощения собирает прошедший через камеру поглощения свет и направляет его в фотодиод.

Одновременно с оптическим воздействием атомы изотопа  $Rb^{87}$  подвергаются воздействию поля, создаваемого радиочастотной катушкой. Частота поля поддерживается равной частоте магнитного резонанса атомов. При этом частота магнитного резонанса  $f_{\text{res}}$  связана со значением индукции магнитного поля  $B$  через гиромагнитное отношение. Его величина зависит от рабочего вещества магниточувствительного датчика и для  $Rb^{87}$  составляет  $K \approx 6,995795$  Гц/нТл.

Для обеспечения нормальной работы системы слежения за центром линии магнитного резонанса в частоту резонансного поля вводится низкочастотная фазовая модуляция, которая вызывает изменение прозрачности камеры поглощения. При точном совпадении значения частоты резонансного поля частоте магнитного резонанса на выходе фотодиода имеется только вторая гармоника частоты модуляции. При несовпадении частот поля и магнитного резонанса на выходе фотодиода появляется первая гармоника частоты модуляции, фаза которой несет информацию о знаке расстройки, а амплитуда – о величине расстройки. Таким образом, сигнал с фотодиода управляет работой системы слежения, заставляя радиочастотную катушку менять частоту поля так, чтобы она была равна частоте магнитного резонанса. Синхронизация со временем и навигационным модулем ведется 10 раз в секунду.

В настоящее время широкое распространение получил квантовый рубидиевый магнитометр *Geoscan GeoShark*, успешно использующий БПЛА в качестве носителя [14]. На рис. 3 показана схема конструкции устройства, где: ВИП – вторичный измерительный преобразователь; ПИП – первичный измерительный преобразователь; А1 – цифровой вычислитель (ЦВ); А2 – система стабилизации температуры камеры (ССТК); А4 – источник тока; А5 – цифровой синтезатор частоты (ЦСЧ); А6 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 1 – контуры обратной связи; 2 – полупроводниковый лазер с вертикальной структурой; 3 – многомодовый световод; 4 – собирающие линзы; 5 – круговой поляризатор; 6 – радиочастотная катушка; 7 – камера с парами щелочного металла; 8 – нагреватель камеры; 9 – фотодиод.

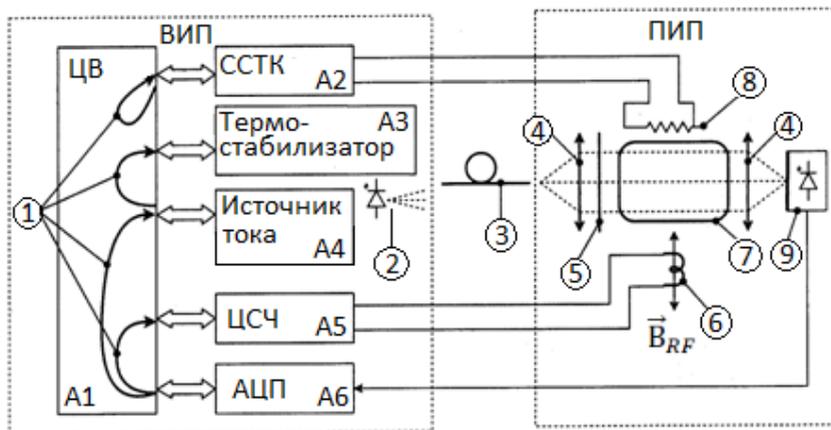


Рис. 3. Устройство квантового магнитометра «Geoscan GeoShark»

Fig. 3. Design of the «Geoscan GeoShark» quantum magnetometer

#### IV. Методика проведения измерений с использованием БПЛА, оборудованных квантовым магнитометром

Методика получения данных магниторазведки с использованием беспилотных летательных аппаратов включает в себя несколько основных этапов.

1. Перед началом измерений определяется целевая область для магниторазведки, и формируются требования к задаче, включая высоту полета, скорость, область исследуемой площади и т. д. При этом необходимо учитывать длину троса, на котором магнитометр прикреплен к квадрокоптеру. С учетом практики в зависимости от типа квадрокоптера и магнитометра длина троса не менее 15 м. В этом случае влияние от магнитного поля БПЛА становится несущественным.

2. Далее выбирается подходящий БПЛА, на который устанавливается специализированный магнитометр с другими необходимыми сенсорами и системы, которые могут использоваться для магниторазведки.

3. Осуществляется запуск БПЛА, и выполняется маршрут полета над исследуемой областью. Исследуемая площадь разбивается на параллельные маршруты – профили, которые располагаются на равном расстоянии друг от друга. Аэромагнитная съемка проводится по системе профилей при непрерывной записи показаний магнитометра на каждом профиле (маршруте) [3]. Магнитное поле измеряется вдоль каждого маршрута. Каждому профилю соответствует график изменения магнитного поля. Расстояние между профилями выбирается в зависимости от планируемого масштаба съемки. Для учета вариаций магнитного поля прибора перед началом исследования

и после его окончания делается специальный вылет на опорный (контрольный) маршрут. При обработке магнитограмм аномальные значения рассчитываются путем вычитания из наблюдаемого значения нормального поля.

4. После сбора данных начинается их обработка и интерпретация. По результатам измерений строят графики магнитного поля для каждого профиля, а также карты магнитных полей. Одна из основных задач магниторазведки – это визуализация магнитного поля на участке изучаемой земной поверхности. Для этих целей используются геоинформационные системы (ГИС). Данные магниторазведки импортируются в ГИС при помощи соответствующих инструментов и функций. С помощью специального программного обеспечения файлы с точечными значениями магнитного поля (в Тл) в конкретных точках маршрута визуализируются в виде цветовой гаммы [1] в зависимости от значений измеренного магнитного поля. Далее между точками производится аппроксимация и строится карта магнитного поля.

5. После успешного осуществления визуализации магнитных полей в виде графиков и карт начинается анализ и интерпретация полученных результатов. Начинается решение обратной задачи магниторазведки [15, 16]. Она заключается в определении размеров, структуры, объема и глубины залегания горных пород или техногенных объектов по полученным распределениям магнитных полей.

Один из первых ярких примеров успешного применения БПЛА – аэромагнитная съемка при поиске рудных месторождений в Казахстане в 2017 г. [9]. Исследуемый участок аэромагнитной съемки находится в Восточном Казахстане на южном склоне горного хребта на юго-западе Казахстанского Алтая. Аэромагнитная съемка выполнялась в составе комплексных геологоразведочных работ на руды золотокварцевого типа. Съемка была выполнена квантовым рубидиевым магнитометром. В качестве носителя использовался БПЛА мультироторного типа.

Для проведения измерений использовался квадрокоптер «Геоскан 401». БПЛА был оснащен системой автоматического управления, инерциальной навигационной системой, двухчастотным навигационным приемником сигналов *GPS*/ГЛОНАСС, контроллером управления полезной нагрузкой, цифровым каналом связи для передачи командно-телеметрической информации.

За это время было выполнено 22 погонных км магнитной съемки. За один день измерений удалось пройти до 160 км маршрута. Магнитометр подвешивался к БПЛА на капроновом шнуре длиной 20 м. Магнитное поле регистрировалось с частотой 1000 Гц. Частота записи данных *GPS* приемника составляла 10 Гц. Антенна *GPS* приемника была закреплена на штанге на расстоянии 1 м от датчика магнитометра.

Во время аэромагнитной съемки датчик находился на высоте 50 м. Исследуемая область была разбита на параллельные маршруты с шагом в 50 м. На рис. 4, а представлены результаты аэромагнитной съемки в виде цветного изображения карты аномального магнитного поля.

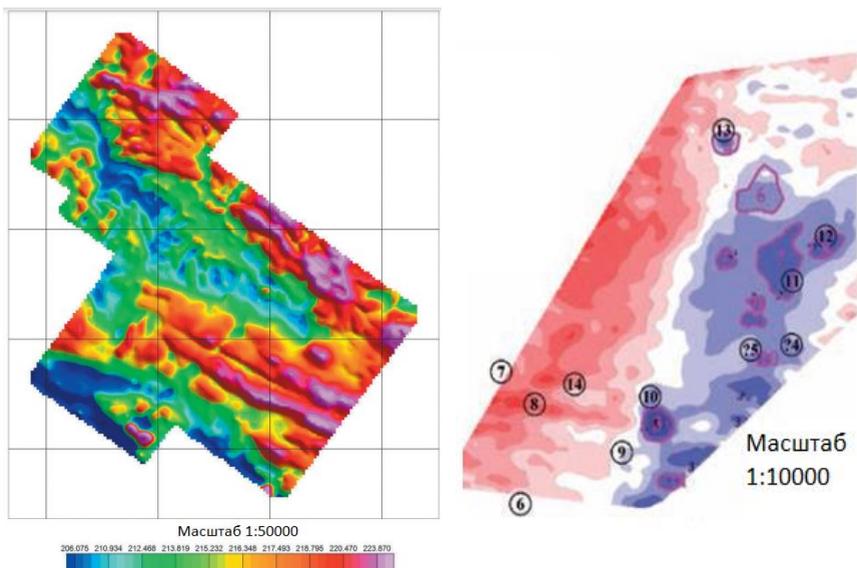


Рис. 4. Карты магнитных полей: при поиске рудных месторождений (а); при поиске археологических памятников (б)

Fig. 4. Maps of magnetic fields: in the search for ore deposits(a); in the search for archaeological monuments (b)

В результате применения новых технологий удалось повысить детальность и производительность магнитной съемки в десятки раз, а также существенно улучшить точность измерений по сравнению с существующими данными.

Помимо геологоразведочных работ, беспилотные системы также нашли применение и в области археологии [17]. До начала раскопок магниторазведка может помочь определить местоположение и характеристики потенциальных археологических объектов. Это позволяет более эффективно оптимизировать процесс. Магниторазведка может быть использована для изучения культурных слоев, обнаруживая аномалии в магнитных свойствах грунта, которые могут указывать на присутствие археологических объектов разных временных эпох [18]. Так, например, в 2019 г. проводились

магниторазведочные работы при поиске курганов в Шелаболихинском районе Алтайского края. В задачи геофизического исследования входило выявление магнитных аномалий на месте визуально не фиксирующихся насыпей на площади исторического памятника, а также выяснение структуры надмогильных сооружений крупных курганов. В ходе исследовательских работ применялся метод разновысотной аэромагнитной съемки с использованием БПЛА мультироторного типа и портативного высокочастотного магнитометра. Результаты аэромагнитной съемки представлены в виде карты аномального магнитного поля, созданной с помощью программного комплекса «Surfer» (рис. 4, б). Цифрами отмечены возможные места расположения археологических объектов, обнаруженных на основании анализа карты магнитных полей и спутниковых снимков. В результате проведения магниторазведки была получена информация о крупных погребальных сооружениях. Выявленные аномалии магнитного поля помогут усовершенствовать методику получения данных об археологических памятниках.

#### **V. Заключение**

Использование беспилотных летательных аппаратов в геофизических исследованиях обладает рядом преимуществ. БПЛА могут быстро и легко доставляться в удаленные или труднодоступные области, где проведение геофизических изысканий с использованием традиционных методов может быть существенно затруднено или вообще невозможно. Преимущества беспилотной магниторазведки перед наземной очевидны: аэромагнитная съемка обладает гораздо большей производительностью и эффективностью. БПЛА предоставляют новые возможности в выборе маршрутов и параметров исследования, позволяя проводить исследования на больших площадях за более короткий период времени. Современные беспилотные системы обеспечивают высокую точность и разрешение данных благодаря применению передовых технологий и датчиков. В настоящее время основное преимущество данного метода заключается в снижении трудоемкости и затрат на проведение работ без ущерба для качества измерения магнитных полей на исследуемых территориях.

Среди перспективных направлений исследований остается повышение точности воздушной магниторазведки как геофизического метода исследования. Эта задача может быть частично решена за счет совершенствования навигации, оптимизация веса оборудования, скорости передвижения в процессе работы, автоматизации движения по маршруту при неблагоприятных погодных условиях, совершенствования технологий производства конструктивных материалов. Кроме того, актуальны исследовательские работы, связанные с удешевлением и повышением эффективности самих магнитометров, размещаемых на борту несущих летательных аппаратов.

В статье представлены варианты реализации магнитометра, размещаемого на промышленном БПЛА, приведена методика проведения магнито-разведки, частично с анализом результатов. Обоснована практическая значимость. Таким образом, современные промышленные БПЛА, оборудованные квантовыми магнитометрами, представляют собой достаточно эффективный и мощный инструмент для проведения геофизических исследований, обеспечивая экономическую выгоду, мобильность и высокую точность измерений.

© Петленко Д.Б., 2024

© Авдонин Е.А., 2024

*Поступила в редакцию 27.05.2024*

*Принята к публикации 09.07.2024*

*Received 27.05.2024*

*Accepted 09.07.2024*

### Библиографический список

- [1] Петленко Д.Б. Применение магнитометров в геологии // Межд. межведомственная науч.-тех. конф. «Космические технологии-2023», Октябрь 26, 2023, Москва, Россия. М.: РТУ МИРЭА, 2024. С. 164-169.
- [2] Журбин И.В. Археология и геофизика: принципы комплексных исследований // Российская археология. 2004. № 3. С. 79-88.
- [3] Тарасов А.В., Ихина Э.Р., Каюков А.Е., Гоглев Д.А. Опыт применения низковысотной аэромагнитной съемки с комплексом ГЕОСКАН-401-Геофизика на Сынырьском ультракалийевом массиве // Разведка и охрана недр. 2019. № 10. С. 20-31.
- [4] Гоглев Д.А. Беспилотные технологии для геологоразведки: устоявшийся тренд или новое направление? // Конференция «Беспилотная отрасль — 2023», Февраль 16-17, 2023, Томск, Россия. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.geoscan.ru/themes/geoscan/assets/seminary/geoscan\\_tpu\\_conf\\_2023/materials/Гоглев\\_Аэромагнитная%20съемка.pdf](https://www.geoscan.ru/themes/geoscan/assets/seminary/geoscan_tpu_conf_2023/materials/Гоглев_Аэромагнитная%20съемка.pdf) (дата обращения 23.11.2023).
- [5] Новиков К.В. Магниторазведка. Часть 1. М.: МГРИ-РГГРУ, 2013. – 141 с.
- [6] Хмелевской В.К., Костицын В.И. Основы геофизических методов. Пермь: Перм. ун-т, 2010. – 400 с.
- [7] Магнитная съемка // ГК «Геоскан». [Электронный ресурс]. URL: [https://www.geoscan.ru/ru/services/aeromagnetic\\_survey](https://www.geoscan.ru/ru/services/aeromagnetic_survey) (дата обращения 24.11.2023).
- [8] Геоскан 401 Геофизика // ГК «Геоскан». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.geoscan.ru/ru/products/geoscan401/geophysics> (дата обращения: 23.11.2023).
- [9] Коврижных П.Н., Кожамсугиров Д.О., Кожевников С.Н., Макаров Д.В., Капштан Д.Я. Инновационная аэромагнитная съемка с применением беспилотного летательного аппарата при поисках рудных месторождений в Казахстане // Геология и охрана недр. 2017. № 4 (65). С. 34-42.

- [10] Груздев Р.В. Магниторазведочные работы – наземная технология, аэромагнитная съемка на самолете и беспилотном летательном аппарате: сопоставительный анализ результатов (на примере Восточного Забайкалья) // Вестник Забайкальского Государственного Университета. 2020. № 26 (8). С. 6-15. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-8-6-15
- [11] Лукьянова Р.Ю., Гвишиани А.Д. Геоинформатика и наблюдения магнитного поля земли: Российский сегмент // Физика земли. 2015. № 2. С. 3-20. DOI: 10.7868/S0002333715020040
- [12] Звездинский С.С., Парфенцев И.В. Квантовые магнитометры с оптической накачкой для поиска взрывоопасных предметов // Спецтехника и связь. 2009. № 3. С. 18-28.
- [13] Стерлигов Б.В., Курмаева В.В., Капштан Д.Я., Дмитриев К.А. Квантовый рубидиевый MZ Аэромагнитометр, Пат. RU 169455 U1, заявл. 18.07.16; опубл. 21.03.17.
- [14] Капштан Д.Я. Способ измерения магнитного поля земли и квантовый магнитометр для реализации такого способа, Пат. RU 2784201 C1, заявл. 15.09.21; опубл. 23.11.22. – Бюл. № 33.
- [15] Блох Ю.И. Решение прямых задач гравиразведки и магниторазведки. М.: МГГА, 1993. – 79 с.
- [16] Паршин А.В., Будяк А.Е., Блинов А.В., Костеров А.Н, Морозов В.А., Михалев А.О., Просекин С.Н., Тарасова Ю.И., Спиридонов А.М. Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Часть 2 // География и природные ресурсы. 2016. № S6. С. 150-155. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)
- [17] Отажонова Ш.Х.к., Вахобов Ж.А.у. Применение геофизических методов в археологических исследованиях в Узбекистане // Universum: общественные науки. 2023. № 8 (99). С. 4-8. DOI: 10.32743/UniSoc.2023.99.8.15884
- [18] Тишкин А.А., Фирсов А.П., Фролов Я.В., Колесов А.С., Останин В.А., Лукин А.А., Малетин Ю.Ю. Результаты трехуровневой аэромагнитной съемки на археологическом памятнике «Ивановка-I, курганная группа» (Шелаболихинский район Алтайского края) // Теория и практика археологических исследований. 2019. № 28 (4). С. 129-140. DOI: 10.14258/tpai(2019)4(28).-09

## References

- [1] D.B. Petlenko, “Application of magnetometers in geology”, in proc. *Int. interdepart. sci.-tech. conf. “Kosmicheskie tekhnologii-2023 [Space technologies-2023]”*, Oct. 26, 2023, Moscow, Russia, pp. 164-169.
- [2] I.V. Zhurbin, “Archaeology and geophysics: principles of complex investigation”, *Russian Archaeology*, no. 3, pp. 79-88, 2004.
- [3] A.V. Tarasov, E.R. Ikhina, A.E. Kayukov, D.A. Goglev, “Experience of using low-altitude aeromagnetic survey with the complex Geoscan-401-Geophysics at the Synyr ultrapotassic igneous massif”, *Razvedka i Ohrana Nedr [Exploration and Protection of Mineral Resources]*, no. 10, pp. 20-31, 2019.

- [4] D.A. Goglev, *Bespilotnye tekhnologii dlya geologorazvedki: ustoyavshijsya trend ili novoe napravlenie?* [Unmanned technologies for geological exploration: an established trend or a new direction?], presented at the *conf. Bespilotnaya otrasl' 2023 [Unmanned Industry 2023]*, Feb. 16-17, 2023, Tomsk, Russia [Online]. Available at: [https://www.geoscan.ru/themes/geoscan/assets/seminary/geoscan\\_tpu\\_conf\\_2023/materials/Гоглев\\_Аэромагнитная%20съёмка.pdf](https://www.geoscan.ru/themes/geoscan/assets/seminary/geoscan_tpu_conf_2023/materials/Гоглев_Аэромагнитная%20съёмка.pdf) [Accessed: Nov. 23, 2023] (in Russian).
- [5] K.V. Novikov, *Magnitorazvedka. CHast' 1 [Magnetic prospecting. Part 1]*. Moscow: MGRI-RGGRU, 2013 (in Russian).
- [6] V.K. Khmelevskoy and V.I. Kostitsyn, *Osnovy geofizicheskikh metodov [Fundamentals of geophysical methods]*. Perm: Perm. University, 2010 (in Russian).
- [7] *Magnitnaya s'emka [Magnetic survey]*. [Online]. Available at: [https://www.geoscan.ru/ru/services/aeromagnetic\\_survey](https://www.geoscan.ru/ru/services/aeromagnetic_survey) [Accessed: Nov. 24, 2023] (in Russian).
- [8] *Geoskan 401 Geofizika [Geoscan 401 Geophysics]*. [Online]. Available at: <https://www.geoscan.ru/ru/products/geoscan401/geophysics> [Accessed: Nov. 23, 2023] (in Russian).
- [9] P.N. Kovrizhnykh, D.O. Kozhamsugirov, S.N. Kozhevnikov, D.V. Makarov and D.Ya. Kapshtan, "Innovacionnaya aeromagnitnaya s'emka s primeneniem bespilnogo letatel'nogo apparata pri poiskah rudnyh mestorozhdenij v Kazahstane [Innovative aeromagnetic survey using an unmanned aerial vehicle in the search for ore deposits in Kazakhstan]", *Geologiya i ohrana nedr [Geology and subsurface protection]*, vol. 4, no. 65, pp. 34-42, 2017 (in Russian).
- [10] R.V. Gruzdev, "Magnetic survey – ground technology, aeromagnetic survey on aircraft and unmanned aerial vehicles: a comparative analysis of the results (on the example of Eastern Transbaikalia)", *Transbaikal State University Journal*, vol. 26, no. 8, pp. 6-15, 2020. DOI 10.21209/2227-9245-2020-26-8-6-15
- [11] A.D. Gvishiani and R.Yu. Lukyanova, "Geoinformatics and observations of the earth's magnetic field: the Russian segment", *Fizika zemli*, no. 2, pp. 3-20, 2015. DOI: 10.7868/S0002333715020040
- [12] S.S. Zvezhinsky and I.V. Parfentsev, "Kvantovye magnitometry s opticheskoy nakachkoj dlya poiska vzryvoopasnyh predmetov [Quantum magnetometers with optical pumping for searching explosive objects]", *Spektr tekhnika i svyaz' [Special equipment and communications]*, no. 3, pp. 18-28, 2009 (in Russian).
- [13] B.V. Sterligov, V.V. Kurmaeva, D.Ya. Kapshtan and K.A. Dmitriev, "Kvantovyy rubidievyy MZ Aeromagnitometr [Quantum rubidium MZ Aeromagnitometer]", Patent RU 169455 U1, Mar. 20, 2017 (in Russian).
- [14] D.Y. Kapshtan, "Method for measuring the earth's magnetic field and a quantum magnetometer for implementing such a method", Patent RU 2784201 C1, Nov. 23, 2022.
- [15] Yu.I. Blokh, *Reshenie pryamyyh zadach gravirazvedki i magnitorazvedki [Solving direct problems of gravity prospecting and magnetic prospecting]*. Moscow: MGGA, 1993 (in Russian).
- [16] A.V. Parshin, A.E. Bydyak, A.V. Blinov, A.N. Kosterev, V.A. Morozov, A.O. Mikhalev, S.N. Prosekin, Yu.I. Tarasova and A.M. Spiridonov, "Low-altitude unmanned aeromagnetic survey in management of large-scale structural geological mapping and prospecting for ore deposits in composite topography. Part 2", *Geografya i Prirodnye*

- Resursy*, no. S6, pp. 150-155, 2016. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)
- [17] S. Otajonova and J. Vakhobov, “Application of geophysical methods in archaeological research in Uzbekistan”, *Universum: Social Sciences*, vol. 8, no. 99, pp. 4-8, Aug. 2023. DOI: 10.32743/UniSoc.2023.99.8.15884
- [18] A.A. Tishkin, A.P. Firsov, Ya.V. Frolov, A.S. Kolesov, V.A. Ostanin, A.A. Lukin, Yu.Yu. Maletin, “Results of a three-level aeromagnetic shooting at the archaeological site of “Ivanovka-I, barrow group” (Shelabolikhinsky district of the Altai Territory)”, *Theory and Practice of Archaeological Research*, vol. 28, no. 4, pp. 129-140, 2019. DOI: 10.14258/tpai(2019)4(28).-09

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Петленко Дмитрий Борисович**, **Dmitry B. Petlenko**, Cand. Sci. (Eng.), кандидат технических наук, доцент МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация, associate professor of the MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation.

**Авдонин Евгений Алексеевич**, **Evgeniy A. Avdonin**, postgraduate student аспирант МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация, of the MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation.

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.315.619.3

EDN MIVDQF

**ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ  
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ  
С ПОЛИМЕРНО-ГАЗОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ****Д.И. Ковалев**

ORCID: 0009-0009-0920-5129 e-mail: kovalevdm1@mpei.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия***В.Н. Вариводов**

ORCID: 0009-0003-1400-2322 e-mail: vvarivodov@gmail.com

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия***Д.В. Голубев**

ORCID: 0000-0002-4258-8741 e-mail: golubevdl@mpei.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия***С.А. Елфимов**

ORCID: 0009-0001-5226-904X e-mail: sa.elfimov@yandex.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия***С.С. Жуликов**

ORCID: 0009-0006-5969-3720 e-mail: tech-ems@mail.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия*

Рассматривается процесс многопараметрического оптимизационного расчета конструкций полимерно-газового токопровода напряжением 35 кВ и пофазно-экранированного токопровода 24 кВ. В контексте развития распределительных устройств высокого напряжения подчеркивается важность повышения надежности, компактности и снижения затрат на обслуживание. Исследование направлено на оптимизацию геометрических размеров токоведущих жил и слоев изоляции с целью обеспечения соответствия эксплуатационным требованиям по температуре и напряженности электрического поля. Представлены результаты численного моделирования, выполненного с использованием метода конечных элементов, где основное

внимание уделяется распределению напряженности электрического поля и температурным режимам в конструкции до и после оптимизации. Приведенные результаты демонстрируют значительное снижение максимальной напряженности электрического поля и температуры в токопроводе, что способствует повышению надежности и снижению риска пробоев изоляции. Статья может быть применима для дальнейших исследований в области оптимизации изоляционных систем и разработки высоковольтного оборудования, учитывающего как технико-экономические, так и эксплуатационные параметры.

**Ключевые слова:** высоковольтное оборудование, многопараметрическое моделирование, оптимизация изоляционных систем, полимерно-газовая изоляция, температурные режимы, численное моделирование, электрическое поле.

**Для цитирования:** Ковалев Д.И., Вариводов В.Н., Голубев Д.В., Елфимов С.А., Жуликов С.С. Оптимизационный расчет электрофизических параметров распределительных устройств с полимерно-газовой изоляцией // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 4. С. 86-99. EDN MIVDQF

## OPTIMIZATION CALCULATION OF ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF SWITCHGEAR WITH POLYMER-GAS INSULATION

**D. I. Kovalev**

ORCID: 0009-0009-0920-5129 e-mail: kovalevdm1@mpei.ru

National Research University «MPEI»

*Moscow, Russia*

**V.N. Varivodov**

ORCID: 0009-0003-1400-2322 e-mail: vvarivodov@gmail.com

National Research University «MPEI»

*Moscow, Russia*

**D.V. Golubev**

ORCID: 0000-0002-4258-8741 e-mail: golubevdvl@mpei.ru

National Research University «MPEI»

*Moscow, Russia*

**S.A. Elfimov**

ORCID: 0009-0001-5226-904X e-mail: sa.elfimov@yandex.ru

National Research University «MPEI»

*Moscow, Russia*

**S.S. Zhulikov**

ORCID: 0009-0006-5969-3720 e-mail: tech-ems@mail.ru

National Research University «MPEI»

*Moscow, Russia*

**Abstract.** The paper considers the process of multiparameter optimization calculation of the structures of a 35 kV polymer-gas busbar and a 24 kV phase-shielded busbar. In the context of the development of high-voltage switchgear, the importance of increasing reliability, compactness and reducing maintenance costs is emphasized. The study is aimed at optimizing the geometric dimensions of current-carrying cores and insulation layers in order to ensure compliance with operational requirements for temperature and electric field strength. The results of numerical modeling performed using the finite element method are presented, where the main attention is paid to the distribution of electric field strength and temperature conditions in the structure before and after optimization. The presented results demonstrate a significant decrease in the maximum electric field strength and temperature in the busbar, which contributes to increased reliability and reduced risk of insulation breakdowns. The article can be applied for further research in the field of optimization of insulation systems and development of high-voltage equipment, taking into account both technical, economic and operational parameters.

**Keywords:** electric field, high-voltage equipment, numerical modeling, multiparameter modeling, polymer-gas insulation, optimization of insulation systems, temperature conditions.

**For citation:** D.I. Kovalev, V.N. Varivodov, D.V. Golubev, S.A. Elfimov and S.S. Zhulikov, "Optimization calculation of electrophysical parameters of switchgear with polymer-gas insulation", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 86-99, 2024. EDN MIVDQF

## I. Введение

Развитие распределительных устройств высокого и сверхвысокого напряжения отражает общие тенденции совершенствования электрических сетей: повышение надежности, управляемости, компактности, экологичности и безопасности, снижение затрат на обслуживание, оптимизацию технико-экономических характеристик [1-3].

Распределительные высоковольтные устройства (РУ) представляют собой ключевые компоненты, неотъемлемо связанные с успешной интеграцией энергетических систем. В их состав входит коммутационное оборудование, измерительное и защитное оборудование, устройства поддержания качества электроснабжения, высоковольтные токопроводы или шинопроводы для связей внутри подстанции и внутри самого распределительного устройства [4-6].

На данный момент существуют различные технические вопросы, которые требуют выбора конкретных материалов, доработок, проведения реальных расчетов и испытаний изоляционных конструкций распределительного оборудования. В частности, актуальной является задача оптимизации изоляционных конструкций токопроводов различного назначения [7-8].

Целью оптимизации является подбор оптимальных геометрических размеров, в частности, толщин токоведущей жилы, а также толщин всех

слоев изоляции при условии, что температура токоведущей жилы и напряженность электрического поля в каждом слое изоляции соответствует эксплуатационным требованиям. В данном расчете в качестве примера рассматривается полимерно-газовый токопровод с многослойной комбинированной изоляцией на номинальное напряжение 35 кВ и пофазно-экранированный токопровод на 24 кВ.

### **II. Разработка расчетных моделей и определение допустимых значений параметров**

В соответствии с требованиями СТО [9], длительно допустимая температура нагрева составных частей токопровода при номинальном токе не должна превышать установленных норм. Для шин, компенсаторов и разборных контактов, покрытых серебром, эта температура не должна превышать +105 °С, а для соединений – +115 °С, что соответствует требованиям СТО 34.01-23-004-2019. Кроме того, следует отметить, что для токопроводов со сварными соединениями таких ограничений нет, а температура в середине секций токопроводов с твердой изоляцией может существенно превышать температуру в зоне контактов, где теплоотвод лучше.

В табл. 1 приведены допустимые рабочие напряженности электрического поля при длительном воздействии напряжения в различных компонентах внутренней изоляции [7] (элегазе, эпоксидном компаунде, элегазе вблизи поверхности изоляторов и пленочно-элегазовой изоляции).

**Таблица 1.**  
Допустимые рабочие напряженности электрического поля при длительном воздействии напряжения [10]

**Table 1.**  
Permissible working electric field strengths under long-term exposure to voltage [10]

Компоненты внутренней изоляции	Допустимая напряженность электрического поля, кВ/см, при давлении элегаза, МПа				
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Элегазовые промежутки	54	73	92	108	122
Элегаз вблизи поверхности изоляторов	44	59	74	86	98
Литая эпоксидная изоляция	60	60	60	60	60
Пленочно-элегазовая изоляция	102	127	153	187	212

При определении температуры шины и слоев изоляции, а также возникающей в них напряженности электрического поля, наиболее предпочтительно рассматривать сечение трехмерной модели. Получаемая сечением

двухмерная модель имеет не только возможность обеспечить точность проводимых вычислений, но и снизить вычислительную нагрузку, повысить эффективность проводимых вычислений. Структуры моделей для оптимизации высоковольтных устройств представлены на рис. 1.

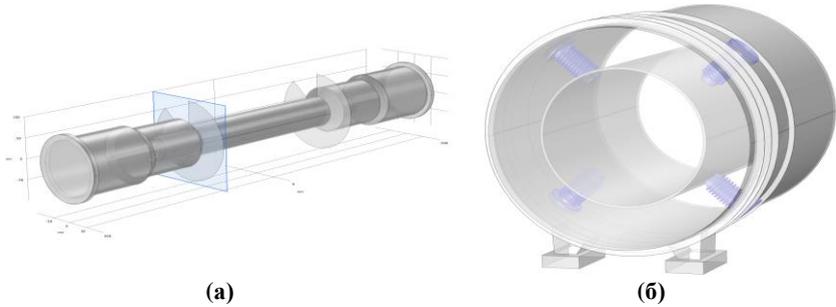


Рис. 1. Модели полимерно-газового токопровода (а), пофазно-экранированного токопровода (б)

Fig. 1. Models of a polymer-gas busbar (a), of a phase-shielded busbar (b)

Оптимизационный расчет может быть применим к геометрическим параметрам: диаметрам и толщинам токоведущих жил, а также всем слоям изоляции. При проведении расчета одновременно учитывается напряженность электрического поля и температура. Основными оцениваемыми параметрами является величины максимальной напряженности электрического поля и температуры в каждом слое.

При каждом изменении геометрических параметров конструкции автоматически проводится итерация численного моделирования с использованием метода конечных элементов. Все данные, полученные в результате моделирования, включая распределение температур, напряженностей электрического и магнитного поля, автоматически систематизируются для последующего анализа. Данный подход позволяет точно оценить влияние каждого изменения на характеристики устройства и оптимизировать структуру с учетом эксплуатационных требований и возможной минимизации материальных затрат на производство.

По результатам многопараметрического моделирования рассчитывается оптимизационная функция, учитывающая веса, нормализацию параметров, нелинейности рассматриваемых зависимостей, а также граничные условия путем введения штрафов в основную оптимизационную функцию (1). Минимальное значение функции позволяет выбрать наиболее оптимальные геометрические параметры.

$$F = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \left( \frac{\alpha_i}{\beta_i} \right)^{\gamma_i} + \sum_{j=1}^m P_j \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $\omega_i$  – весовые коэффициенты для каждого параметра;  $\alpha_i$  – оптимизационные коэффициенты;  $\beta_i$  – нормализующие коэффициенты для каждого параметра;  $\gamma_i$  – степени, определяющие нелинейность влияния каждого параметра;  $P_j$  – штрафные функции для каждого граничного условия;  $n$  – количество оптимизационных параметров;  $m$  – количество граничных условий.

### III. Оптимизационный расчет полимерно-газового токопровода

При проведении численного моделирования распределения напряженности электрического поля на токоведущую шину прикладывалась токовая нагрузка 1600 А при фазном напряжении  $35/\sqrt{3}$ . Металлическая оболочка заземлена. Предварительно на рассматриваемой модели строится геометрическая сетка для расчета методом конечных элементов, представленная на рис. 2.

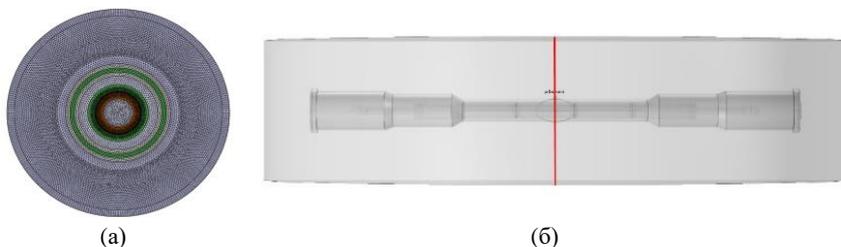
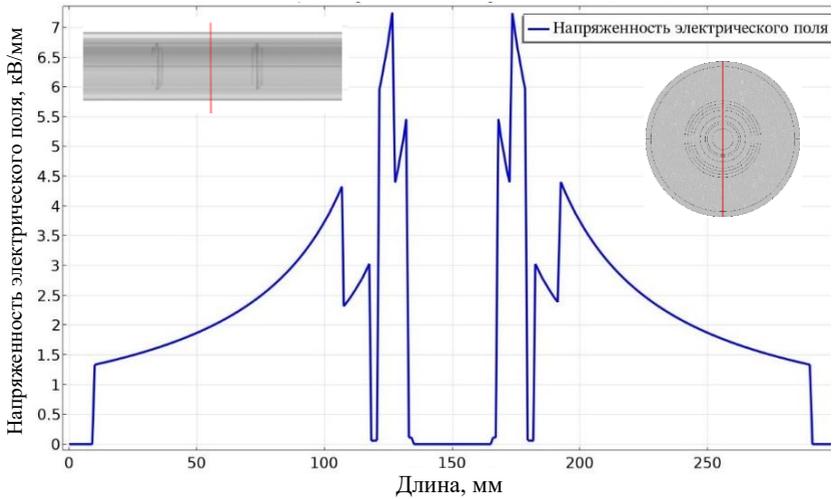


Рис. 2. Геометрическая сетка для проведения оптимизации (а); трехмерная модель с определением места оптимизации (б)

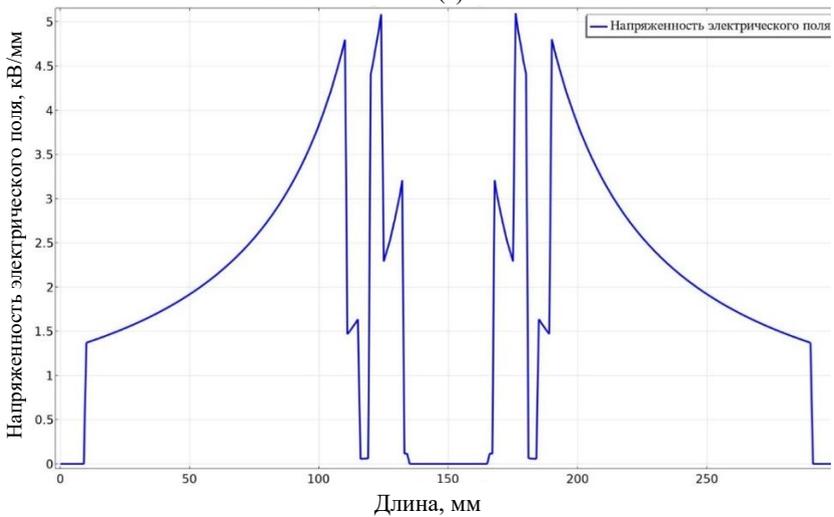
Fig. 2. Geometric grid for optimization (a); three-dimensional model with the definition of the optimization location (b)

На рис. 3, а представлен расчет напряженности электрического поля в поперечном сечении линейной части полимерно-газового токопровода до применения оптимизационной модели.

В поперечном сечении линейной части токопровода 35 кВ значения напряженности ЭП достигают  $\bar{E}_{norm} = 7$  кВ/мм при 0,2 МПа. Данное значение выше максимально допустимой напряженности ЭП, которое составляет  $E_{max} = 5,4$  кВ/мм при 0.2 МПа, что позволяет сделать вывод о необходимости оптимизации конструкции спроектированного оборудования. Температуры, возникающие внутри изоляции, находились в допустимых значениях. Трехмерное распределение напряженности ЭП и температуры в полимерно-газовом токопроводе представлено на рис. 4, а и б.



(а)



(б)

**Рис. 3. График распределения напряженности ЭП в поперечном сечении линейной части до оптимизации (а) и после оптимизации (б)**

**Fig. 3. Graph of the distribution of the electric field strength in the cross-section of the linear part before optimization (a) and after optimization (b)**

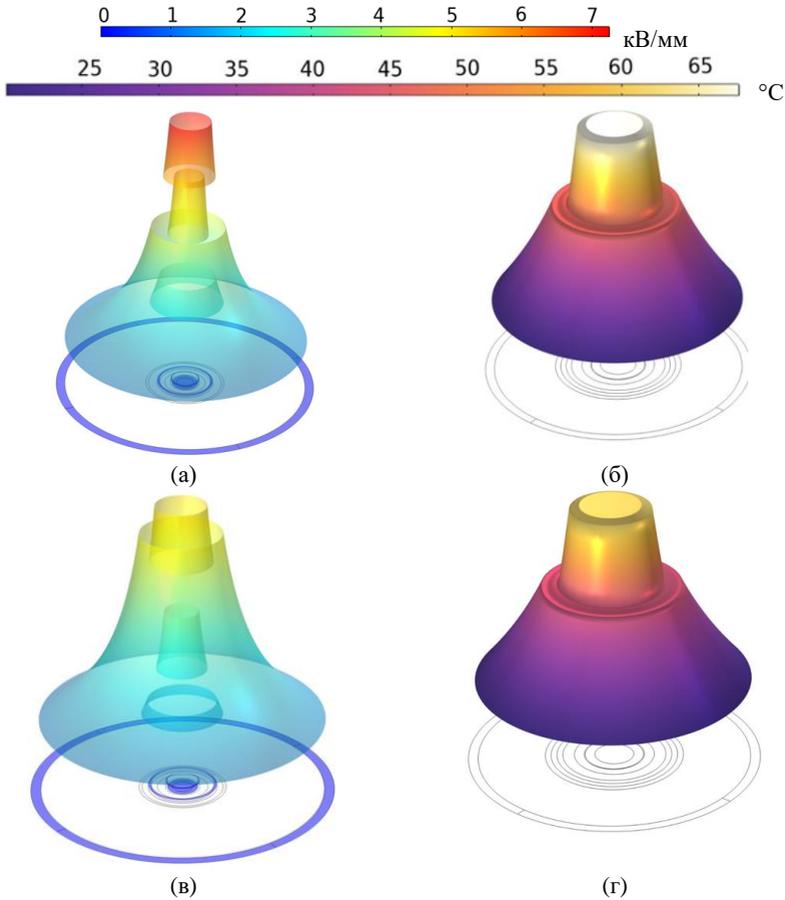


Рис. 4. Распределение ЭП (а, в) и температуры (б, г) в полимерно-газовом токопроводе до оптимизации (а, б) и после оптимизации (в, г)

Fig. 4. Distribution of the electric field (а, в) and temperatures (б, г) in the polymer-gas conductor before optimization (а, б) and after optimization (в, г)

Исходя из подобранных расчетом оптимальных параметров (табл. 2), определяемых итерационным численным моделированием, были построены зависимости напряженности электрического поля (рис. 3, б и 4, в), а также температуры (рис. 4, г), возникающие в процессе эксплуатации полимерно-газового токопровода.

До оптимизации максимальная напряженность составляла 7 кВ/мм.

Области с высокой напряженностью, представленные красным и фиолетовым цветами на графике, более обширны, что свидетельствует о большей концентрации электрического поля, распространяющегося на значительную часть токопровода. В то же время области с низкой напряженностью, обозначенные голубым и зеленым цветами, располагались ближе к краям конструкции.

После проведения оптимизации наблюдается снижение максимальной напряженности до 5 кВ/мм. Область с высокой напряженностью стала менее обширной, что указывает на более равномерное распределение электрического поля. Области с низкой напряженностью занимают большую часть пространства, что означает уменьшение пиковых значений напряженности электрического поля и, соответственно, снижение рисков, связанных с пробоями изоляции. Также оптимизация привела к снижению максимальной температуры с 67,6 до 60 °С, что может снизить риск перегрева и повысить надежность работы токопровода. Температура распределяется более равномерно, что уменьшает вероятность локальных перегревов и способствует улучшению общей термической устойчивости системы.

#### IV. Оптимизационный расчет пофазно-экранированного токопровода

Далее было рассмотрено применение модели оптимизации к конструкции воздушного токопровода ТЭНП-24-37500-685 Г1.

Исходя из подобранных расчетом оптимальных параметров (табл. 2), определяемых итерационным численным моделированием, были построены зависимости температуры в конструкции пофазно-экранированного токопровода до и после оптимизации (рис. 5), возникающие в процессе эксплуатации.

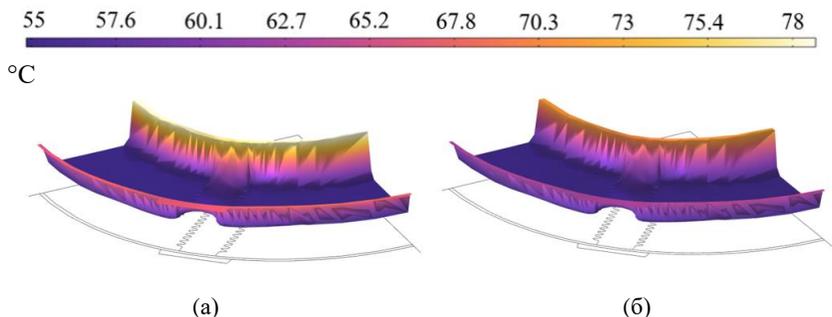


Рис. 5. Распределение температуры в конструкции воздушного токопровода до оптимизации (а), после оптимизации (б)

Fig. 5. Temperature distribution in the overhead current conductor structure before optimization (a), after optimization (b)

До оптимизации температурный диапазон составлял от 50 до 70 °С, при этом максимальная температура достигала 70 °С. Области с высокой температурой занимали значительную часть поверхности, особенно в центральной и верхней частях конструкции. Наблюдались резкие перепады температуры, что свидетельствовало о неравномерности теплового распределения по поверхности токопровода.

После проведения оптимизации температурный диапазон уменьшился и составил от 47 до 66 °С, а максимальная температура снизилась до 66 °С. Это свидетельствует о снижении риска перегрева и способствует более безопасной эксплуатации конструкции. Распределение тепла по поверхности стало более равномерным, о чем свидетельствует уменьшение резких температурных перепадов и сглаживание температурных градиентов. Области с высокой температурой значительно сократились, что снижает вероятность термических повреждений и, как следствие, увеличивает общую надежность конструкции.

**Таблица 2.**  
**Геометрические параметры ТЭНП-24-37500-685 Т1 после оптимизации**

**Таблица 2.**  
**Geometrical parameters of TENP-24-37500-685 T1 after optimization**

Элемент	Оптимизированная структура	Оптимизационный эффект
Наружный диаметр экрана токопровода, мм	1450	увеличилось на 3,57 %
Внутренний диаметр экрана токопровода, мм	1410	увеличилось на 2,17 %
Наружный диаметр шины, мм	890	увеличилось на 1,14 %
Внутренний диаметр шины, мм	850	не изменилось
Температура проводника, °С	66	уменьшилось на 6,06 %
Температура оболочки, °С	59,6	уменьшилось на 12,42 %

Оптимизация привела к более равномерному распределению температуры по поверхности конструкции. Это видно по уменьшению резких перепадов температуры и более плавным градиентам.

Максимальная температура после оптимизации (66 °С) находится в пределах допустимого значения для внешней поверхности токопровода, что соответствует требованиям п. 6.3.5. СТО 34.01-23-004-2019.

## В. Выводы

Необходимость оптимизации полимерно-газового токопровода обусловлена превышением допустимой напряженности электрического поля и температуры в конструкции до оптимизации. Оптимизация позволяет снизить электрическую нагрузку и температуру до безопасных значений, тем самым повышая надежность и долговечность высоковольтного оборудования.

Оптимизация геометрических параметров токопровода, таких как толщина токоведущих жил и слоев изоляции, позволяет уменьшить максимальную напряженность электрического поля с 7 до 5 кВ/мм, что соответствует установленным нормативам для полимерно-газовой изоляции.

В результате оптимизации температура внутри токопровода была снижена с 70 до 66°C, что уменьшает риск перегрева и повышает надежность эксплуатации токопровода.

Оптимизация распределения электрического поля привела к более равномерному его распределению по всей конструкции, что снижает концентрацию электрического поля в критических областях и уменьшает вероятность пробоя изоляции.

Оптимизация конструкции позволяет уменьшить тепловую нагрузку на полимерные материалы, что снижает вероятность термической деградации и механических повреждений изоляции.

Проведенная оптимизация конструкции полимерно-газового токопровода привела к значительному улучшению его электрофизических и тепловых характеристик, обеспечив снижение напряженности электрического поля на 28 % и снижение температуры на 5,7 %, что в итоге повышает срок службы и надежность работы оборудования.

*Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FSWF-2024-0004)*

© Ковалев Д.И., 2024  
© Вариводов В.Н., 2024  
© Голубев Д.В., 2024  
© Елфимов С.А., 2024  
© Жуликов С.С., 2024

*Поступила в редакцию 03.10.2024  
Принята к публикации 16.10.2024  
Received 03.10.2024  
Accepted 16.10.2024*

**Библиографический список**

- [1] Zhao X., Phukan R., Chang C.-W., Burgos R., Dong D., Asfaux P. Design and optimization of 2×211-kW SiC-based aircraft propulsion inverter system with high power density and high efficiency // 2023 IEEE Applied power electronics conference and exposition (APEC), March 19-23, 2023, Orlando, FL, USA: IEEE, 2023. P. 1009-1016. DOI: 10.1109/APEC43580.2023.10131406
- [2] Sun K., Wang J., Burgos R., Boroyevich D., Stewart J., Yan N. Design and multi-objective optimization of an auxiliary wireless power transfer converter in medium-voltage modular conversion systems // IEEE Transactions on power electronics. 2022. № 37 (8). P. 9944-9958. DOI: 10.1109/TPEL.2022.3153971
- [3] Ping A., Wang J., Xiao R., Liu R., Chang Y., Li Q. Trap parameters optimization based on metal particle dynamic simulation method // Symmetry. 2022. № 14 (6). P. 1-15. DOI: 10.3390/sym14061187
- [4] Haque S.M., Ardila-Rey J.A., Umar Y., Mas'ud A.A., Muhammad-Sukki F., Jume B.H., Rahman H., Bani N.A. Application and suitability of polymeric materials as insulators in electrical equipment // Energies. 2021. № 14 (10). P. 1-29. DOI: 10.3390/en14102758
- [5] Ghosh D., Khastgir D. Degradation and stability of polymeric high-voltage insulators and prediction of their service life through environmental and accelerated aging processes // ACS Omega. 2018. № 3 (9). Pp. 11317-11330. DOI: 10.1021/acsomega.8b01560
- [6] Yu S., Li S., Feng Y. Progress in and prospects for electrical insulating materials // High Voltage. 2016. № 1 (3). P. 1-21. DOI: 10.1049/hve.2016.0034
- [7] Kim K.K., Ivanov S. The efficiency of the use of composite materials in electrotechnical equipment // International conference on actual problem of electromechanics and electrotechnology, APEET 2017, Nov. 13-16, 2017, Yekaterinburg, Russia: Institute of Physics Publishing, 2017. P. 012001. DOI 10.1088/1757-899X/313/1/012001
- [8] Wang J., Hu L., Li W., Ouyang Y. Development and perspectives of thermal conductive polymer composites // Nanomaterials. 2022. № 12 (20). DOI: 10.3390/nano12203574
- [9] Токопроводы с литой (твердой) изоляцией на напряжение 6-35 кВ. Технические требования, ОАО «ФСК ЕЭС», 2011. – 13 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rosseti.ru/upload/iblock/f6f/tf39aehcbbnu88hc7pcqrmskaefm9g34.pdf>. (дата обращения 05.09.2024).
- [10] Вариводов В.Н. Внутренняя изоляция газонаполненного оборудования сверхвысокого и ультравысокого напряжения: автореф. дис. доктора техн. наук, Всерос. электротехнический ин-т им. В.И. Ленина, Москва, 2000. – 53 с.

**References**

- [1] X. Zhao, R. Phukan, C.-W. Chang, R. Burgos, D. Dong and P. Asfaux, “Design and optimization of 2×211-kW SiC-based aircraft propulsion inverter system with high power density and high efficiency”, in *proc. 2023 IEEE Applied power electronics conference and exposition (APEC)*, March 19-23, 2023, Orlando, FL, USA, pp. 1009-1016. DOI: 10.1109/APEC43580.2023.10131406

- [2] K. Sun, J. Wang, R. Burgos, D. Boroyevich, J. Stewart and N. Yan, "Design and multiobjective optimization of an auxiliary wireless power transfer converter in medium-voltage modular conversion systems", *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 37, no. 8, pp. 9944-9958, Aug. 2022. DOI: 10.1109/TPEL.2022.3153971
- [3] A. Ping, J. Wang, R. Xiao, R. Liu, Y. Chang and Q. Li, "Trap parameters optimization based on metal particle dynamic simulation method", *Symmetry*, vol. 14, no. 6, pp. 1-15, Jun. 2022. DOI: 10.3390/sym14061187
- [4] S.M. Haque, J.A. Ardila-Rey, Y. Umar, A.A. Mas'ud, F. Muhammad-Sukki, B.H. Jume, H. Rahman and N.A. Bani, "Application and suitability of polymeric materials as insulators in electrical equipment", *Energies*, vol. 14, no. 10, pp. 1-29, May 2021. DOI: 10.3390/en14102758
- [5] D. Ghosh and D. Khastgir, "Degradation and stability of polymeric high-voltage insulators and prediction of their service life through environmental and accelerated aging processes", *ACS Omega*, vol. 3, no. 9, pp. 11317-11330, Sep. 2018. DOI: 10.1021/acsomega.8b01560
- [6] S. Yu., S. Li and Y. Feng, "Progress in and prospects for electrical insulating materials", *High Voltage*, vol. 1, no. 3, pp. 1-21, Sep. 2016. DOI: 10.1049/hve.2016.0034
- [7] K.K. Kim and S. Ivanov, "The efficiency of the use of composite materials in electro-technical equipment", in proc. *International conference on actual problem of electro-mechanics and electrotechnology, APEET 2017*, Nov. 13-16, 2017, Yekaterinburg, Russia, pp. 012001. DOI 10.1088/1757-899X/313/1/012001
- [8] J. Wang, L. Hu, W. Li and Y. Ouyang, "Development and perspectives of thermal conductive polymer composites", *Nanomaterials*, vol. 12, no 20, Oct. 2022. DOI: 10.3390/nano12203574
- [9] *Tokoprovody s litoj (tvyordoj) izolyaciej na napryazhenie 6-35 kV. Tekhnicheskie trebovaniya [Busducts with cast (solid) insulation for voltage of 6-35 kV. Technical requirements]*, FGC UES, 2011. [Online]. Available at: <https://www.rosseti.ru/upload/iblock/f6f/39aehcbnu88hc7pcqrmskaefm9g34.pdf>. [Accessed: Sep. 5, 2024] (in Russian).
- [10] V.N. Varivodov, "Vnutrennyaya izolyaciya gazonapolnennogo oborudovaniya sverhvyssokogo i ul'travysokogo napryazheniya [Internal insulation of gas-filled equipment of extra-high and ultra-high voltage]", D. of Tech. S. thesis, All-Russian Electrotechnical Institute n.a. V.I. Lenin, Moscow, Russia, 2000 (in Russian).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ковалев Дмитрий Игоревич**, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

**Вариводов Владимир Николаевич**, доктор технических наук, профессор Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

**Dmitry I. Kovalev**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the National Research University MPEI, Moscow, Russian Federation.

**Vladimir N. Varivodov**, D. Sci. (Eng.), professor of the National Research University MPEI, Moscow, Russian Federation.

**Голубев Дмитрий Владиславович**, научный сотрудник Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

**Dmitry V. Golubev**, research fellow of the National Research University MPEI, Moscow, Russian Federation.

**Елфимов Сергей Александрович**, научный сотрудник Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

**Sergey A. Elfimov**, research fellow of the National Research University MPEI, Moscow, Russian Federation.

**Жуликов Сергей Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

**Sergey S. Zhulikov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the National Research University MPEI, Moscow, Russian Federation.

УДК 537.527.9

EDN RMRRVH

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ НА ОСНОВЕ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

**Н.Ю. Лысов**ORCID: **0000-0003-4929-9894** e-mail: **streamer.corona@gmail.com**Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
*Москва, Россия***А.В. Клубков**ORCID: **0009-0005-3929-9796** e-mail: **klubkoyalv@mpei.ru**Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
*Москва, Россия***А.А. Нестеренко**ORCID: **0009-0003-1522-3530** e-mail: **nesterenkoala@mpei.ru**Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
*Москва, Россия***Н.А. Акинин**ORCID: **0009-0008-1449-1185** e-mail: **akininna@mpei.ru**Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
*Москва, Россия*

Приведены результаты экспериментального исследования применимости композитных диэлектрических барьеров на основе алюминиевой керамики и наполненных корундом оксидных компаундов в электротехнологических установках на основе барьерного разряда. Рассмотрены и количественно оценены уровни адгезии разработанного композитного барьера к электродам из нержавеющей стали с различным уровнем механической обработки (с различной шероховатостью поверхности). Представлены результаты экспериментальных исследований потерь активной мощности в барьерных генераторах озона с различными типами барьера. Измерения потерь мощности проводились методом непосредственного интегрирования произведения мгновенных значений тока и напряжения на обкладках генератора озона. Показано, что применение предложенного композитного диэлектрического барьера кратно снижает уровень таких потерь. Проведена оценка эффективности синтеза озона в специально созданном экспериментальном озонаторе с возможностью оперативного изменения электродной системы и типа диэлектрического барьера. Полученные кинетические кривые показывают эффективность применения композитного барьера в области высоких плотностей мощности за счет более эффективного отвода тепла из разрядной области, где происходит синтез озона. Показаны плюсы

и минусы создания плоских генераторов озона с композитным диэлектрическим барьером.

**Ключевые слова:** барьерный разряд, композитная изоляция, озон, потери в изоляции.

**Для цитирования:** Лысов Н.Ю., Клубков А.В., Нестеренко А.А., Акинин Н.А. Применение композиционных материалов в высоковольтных электротехнологических установках на основе барьерного разряда // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 4. С. 100-113. EDN RMRRVH

## **APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS IN HIGH-VOLTAGE ELECTROTECHNOLOGICAL INSTALLATIONS BASED ON DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE**

**N.Yu. Lysov**

ORCID: **0000-0003-4929-9894** e-mail: **streamer.corona@gmail.com**

National Research University «MPEI»

*Moscow, Russia*

**A.V. Klubkov**

ORCID: **0009-0005-3929-9796** e-mail: **KlubkovAIV@mpei.ru**

National Research University «MPEI»

*Moscow, Russia*

**A.A. Nesterenko**

ORCID: **0009-0003-1522-3530** e-mail: **nesterenkoala@mpei.ru**

National Research University «MPEI»

*Moscow, Russia*

**N.A. Akinin**

ORCID: **0009-0008-1449-1185** e-mail: **akininna@mpei.ru**

National Research University «MPEI»

*Moscow, Russia*

**Abstract.** The paper presents the results of experimental study of applicability of composite dielectric barriers based on aluminum ceramics and corundum-filled epoxy compounds in barrier discharge-based electro-technological installations. The adhesion levels between the developed composite barrier and stainless-steel electrodes with different levels of mechanical processing (with different surface roughness) have been considered and quantitatively evaluated. The results of experimental studies of active power losses in ozone barrier generators with different types of barriers are presented. Power loss

measurements were carried out by the method of direct integration of the production of instantaneous values of current and voltage on the ozone generator shells. It is shown that the use of the proposed composite dielectric barrier significantly decreases the level of such losses. The efficiency of ozone synthesis in a specially designed experimental ozonator with the possibility of operative change of the electrode system and dielectric barrier type has been evaluated. The obtained kinetic curves show the efficiency of composite barrier application in the region of high-power densities due to more efficient heat removal from the discharge region where ozone synthesis takes place. The pros and cons of creating planar ozone generators with a composite dielectric barrier are shown.

**Keywords:** barrier discharge, composite insulation, insulation losses, ozone.

**For citation:** N.Yu. Lysov, A.V. Klubkov, A.A. Nesterenko and N.A. Akinin, "Application of composite materials in high-voltage electrotechnological installations based on dielectric barrier discharge", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 100-113, 2024. EDN RMRRVH

## I. Введение

Области применения барьерного разряда, где в промежутке между металлическими электродами присутствует слой диэлектрика, на сегодняшний день весьма разнообразны. Данный вид разряда применяется как для модификации поверхностей и газификации угля, так и для создания эксимерных ламп и плазменных экранных панелей [1]. Безусловно, наиболее широкое применение барьерный разряд нашел в синтезе озона из кислород-содержащих газов. Здесь можно говорить о промышленных масштабах использования данного вида газового разряда, функционируют целые заводы с установленной мощностью генераторов озона, превышающей 20 МВт [2]. Неотъемлемой частью большинства современных озонаторов является диэлектрический барьер.

Оптимизации параметров и выбору материала барьера посвящено множество работ [3-7], на основе которых можно выделить ряд требований, выдвигаемых к барьеру при использовании его в конструкции озонатора:

- возможность длительного пребывания в среде озона без повреждения, деформации или потери диэлектрических свойств материала;
- долговременная стойкость к развивающемуся по поверхности разряду;
- высокое поверхностное сопротивление материала;
- высокая диэлектрическая проницаемость;
- низкое значение тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ ;
- высокая теплопроводность;
- высокая электрическая прочность;
- хорошая адгезия к электроду.

Авторам неизвестно о существовании диэлектрического материала,

удовлетворяющего всем вышеперечисленным требованиям, при этом разработчиками и производителями современного озонаторного оборудования уделяется особое внимание вопросу использования многослойных диэлектрических барьеров, где каждый из слоев несет на себе определенные функции. Известны способы [8, 9] наносить на металлические электроды два слоя стекоемали: 1) обеспечивающий хорошую долговременную адгезию диэлектрика к металлу, в том числе, за счет схожих коэффициентов температурного линейного расширения; 2) обеспечивающий высокую стойкость барьера к разряду и эффективный синтез озона. Большинство подобных работ посвящено созданию генераторов озона с цилиндрической формой электродов (т.н. конструкция Велсбаха [10]), где диэлектрик чаще всего наносится на электроды посредством эмалирования. Конструкция же плоских генераторов озона зачастую подразумевает расположение пластинчатых диэлектриков на дисковых или прямоугольных электродах, что неизбежно сопровождается неплотностью прилегания барьера к электроду и, как следствие, образованию газовых полостей различного размера между ними. В данных полостях могут развиваться разрядные явления, снижающие эффективность работы электротехнологической установки из-за отсутствия протока через них рабочего газа. Также присутствие газовых полостей ухудшает отвод тепла из области разряда, что приводит к интенсификации процессов разложения озона.

Определенное количество исследовательских работ посвящено нанесению специальных покрытий на поверхность диэлектрика, находящуюся в разрядной зоне. В результате такой модификации существенно повышается эффективность образования озона. Так, например, в [11] при нанесении на поверхность стеклянных электродов слоя тетрабората натрия («буры») концентрация озона возрастала на 30-50 %. Однако большинство подобных модификаций весьма недолговечны, либо реализуемы на небольших лабораторных озонаторах, где эффективность синтеза озона невелика.

Основной задачей данной работы является модификация плоского барьера электротехнологических установок таким образом, чтобы при сохранении эффективности их работы на высоком уровне снизить потери активной мощности и улучшить механические характеристики и надежность конструкций.

Выбор материалов композиционного барьера обуславливался доступностью материалов, их технологичностью и соответствию озвученным выше требованиям. Было принято решение изготовить диэлектрический барьер из тонкой керамической ( $Al_2O_3$ ) пластины толщиной 0,35 мм и специального наполненного компаунда на основе эпоксидной смолы марки ЭД-20. В качестве наполнителя использовалось стекло с высокой диэлектриче-

ской проницаемостью и электрокорунд в различных пропорциях. Слой керамики находился в непосредственном контакте с разрядной зоной, компаунд же выступал в качестве дополнительного композитного слоя и обеспечивал надежное прилегание керамического диска к электроду и отсутствие воздушных включений между керамикой и металлом.

Процесс создания композитного барьера состоял из большого числа последовательных технологических процессов, включавших вакуумирование отдельных компонентов, смешение, наполнение, заливку, выдерживание при различных температурах и давлениях, конденсацию и т.д. Технологии создания материала будет посвящена отдельная работа. Состав и технология заливки были подобраны таким образом, чтобы обеспечить возможность создания промежуточного слоя толщиной менее 0,5 мм, при этом удалось добиться следующих параметров материала при рабочих частотах установки: относительная диэлектрическая проницаемость 5,5, тангенс угла диэлектрических потерь  $0,9 \cdot 10^{-2}$ , теплопроводность 0,52 Вт/м·К. Измерения параметров проводились согласно [12-14]. Суммарная толщина многослойного диэлектрического барьера в результате составила 0,67 мм. Данная толщина была выбрана с целью сравнения технологической установки с композитным барьером с установкой, работающей с дисковым керамическим барьером такой же толщины.

Для устранения неплотного прилегания барьера к плоским электродам поверхности как электрода, так и барьера стремятся сделать максимально гладкими и плоскими. Высокая шероховатость поверхности барьера, находящейся в разрядной области, еще и негативно сказывается на эффективности синтеза озона [4, 5]. Производители керамики на сегодняшний день выпускают листы любой формы с достаточной точностью по толщине и уровню плоскостности с низкой шероховатостью ( $R_a$  порядка 1 мкм) [15].

Добиться подобной шероховатости на рабочих поверхностях металлических электродов можно только прибегнув к процессам дополнительной шлифовки или полировки. Однако и эти процессы не гарантируют наличия газовых полостей в пространстве между барьером и электродом. Полировка электродов из нержавеющей стали усложняет и удорожает конструкцию генератора озона.

В работе с целью определения уровня адгезии композитного диэлектрика к поверхности электродов и допустимого уровня шероховатости металла было исследовано три вида электродов с различной чистотой обработки поверхностей. Образцы композитного компаунда наносились на пластины, поверхность которых или сохранялась в состоянии, полученном после фрезерной обработки, или же дополнительно обрабатывалась для увеличения или снижения уровня шероховатости: подвергалась дробеструйной

обработке или полировалась, соответственно. Испытания проводились в соответствии с [16]. Данные экспериментальных исследований сведены в табл. 1.

*Таблица 1.*

**Результаты испытаний адгезивной способности композитного компаунда к поверхности металла**

*Table 1.*

**Test results of the adhesive ability of the composite compound to the metal surface**

Вид обработки	Шероховатость $R_a$ , мкм	Адгезия, МПа
Полировка	0,5	2,8
Токарная/фрезерная	6,3	9,6
Дробеструйная	12,5	15,2

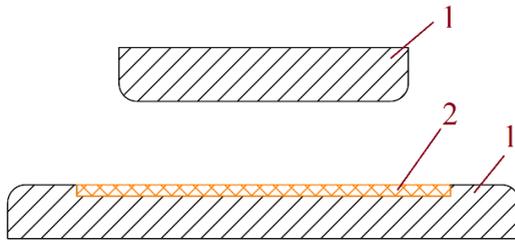
Видно, что применение электродов без дополнительной обработки дает уровень адгезии, позволяющий говорить о надежном прилегании барьера к электроду.

## **II. Описание экспериментальной установки**

В качестве объекта экспериментов был создан специальный плоский генератор озона, позволявший оперативно изменять конфигурацию электродной системы. Электроды изготавливались из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. В большем из электродов диаметром 230 мм в специальном пазе размещался диэлектрический барьер диаметром 100 мм толщиной 0,63 мм из алюминиевой керамики  $Al_2O_3$  (рис. 1). Меньший из электродов диаметром 80 мм располагался на расстоянии 0,4 мм над поверхностью барьера. В подобной конфигурации площадь барьера, занимаемая разрядом, составляла 50 см<sup>2</sup>. Было изготовлено несколько пар электродов с разной степенью шероховатости поверхности и разной глубиной барьерного паза.

Проток кислорода от медицинского концентратора ОХУ 6000 осуществлялся через технологическое отверстие в центре верхнего электрода к его периферии. На электроды подавалось синусоидальное напряжение частотой 25 кГц от специализированного источника питания, позволявшего плавно регулировать напряжение от 0,2 до 10 кВ (амплитуда).

Электродная сборка располагалась в специальном герметичном фторопластовом корпусе, допускающем повышение давления газа внутри до 2 ата. Контроль концентрации кислорода осуществлялся посредством измерителя ПКГ-4 с соответствующим датчиком, его влажность – прибором ИВА-8. Концентрация озона в озono-кислородной смеси на выходе из генератора озона регистрировалась прибором Медозон 254/5. Электрические параметры регистрировались цифровым запоминающим осциллографом *Tektronix* 3012.



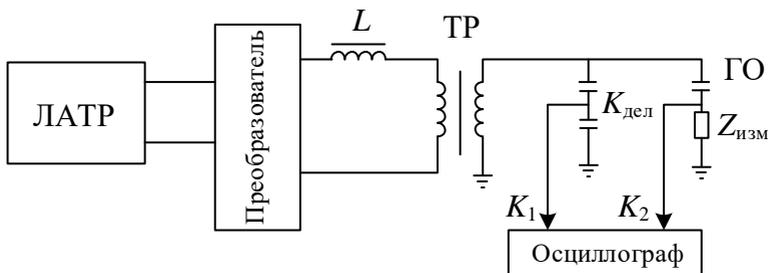
**Рис. 1. Электродная система:**

*1 – металлические электроды; 2 – диэлектрический барьер*

**Fig. 1. Electrode system:**

*1 – metal electrodes; 2 – dielectric barrier*

Принципиальная электрическая схема установки представлена на рис. 2. На выходе лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) установлен преобразователь, к которому, в свою очередь, через дроссель  $L$  подключен высоковольтный трансформатор (ТР). К высокой стороне трансформатора присоединен генератор озона (ГО), который на схеме представлен емкостью. С емкостного делителя напряжения с коэффициентом деления  $K_{\text{дел}}$  на вход  $K_1$  осциллографа поступает сигнал, эквивалентный сигналу напряжения на генераторе озона. На вход  $K_2$  сигнал поступает с измерительного элемента, который представлен на схеме сопротивлением  $Z_{\text{изм}}$ . В ходе эксперимента использовались специально выполненные миниатюрные малоиндуктивные емкостной и резистивный элементы.



**Рис. 2. Схема измерений**

**Fig. 2. Measurement scheme**

Измерение мощности разрядных явлений проводилось методом непосредственного интегрирования мгновенных значения тока и напряжения [17]. Применялся активный измерительный шунт с измерительным сопротивлением  $R_{\text{изм}} = 3,277$  Ом.

С помощью встроенного в осциллограф пакета MATH на его дисплей

выводились не только кривые изменения тока и напряжения (1 и 2 канал, соответственно), но и результат интегрирования их произведения. Пример полученных осциллограмм приведен на рис. 3. При этом фиксировались значения изменения выделенной энергии за промежуток времени ( $\Delta W$  и  $\Delta t$ ), представленные на рис. 3 в правом верхнем углу. Для каждого режима работы снимались значения концентрации озона.

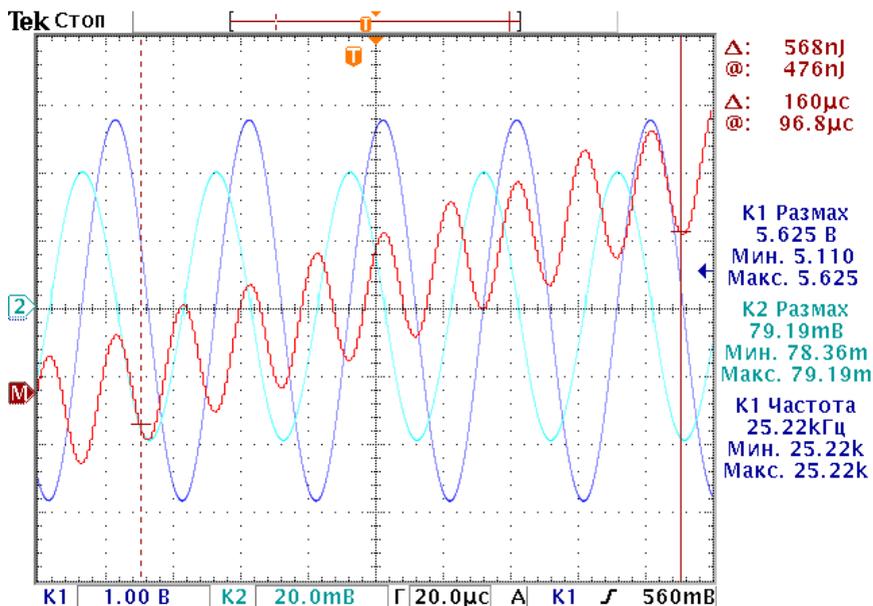


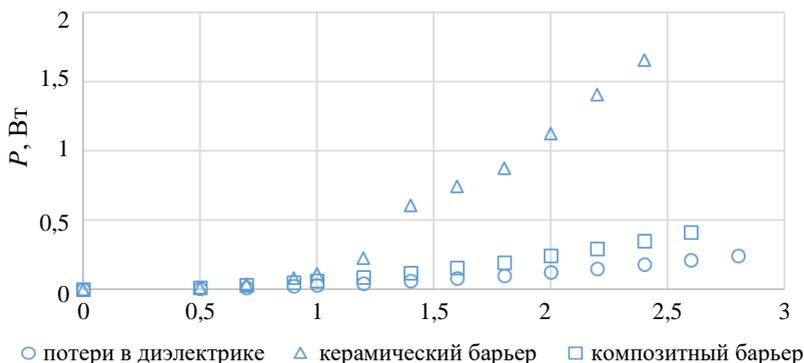
Рис. 3. Осциллограмма тока и напряжения на электродах генератора озона

Fig. 3. Oscillogram of current and voltage at the ozone generator electrodes

### III. Проведение эксперимента

Для оценки уровня дополнительных потерь полезной мощности, связанной с неплотностью прилегания, был проведен следующий эксперимент. На первом этапе оценивались активные потери в листе из алюминиевой керамики толщиной 0,67 мм с использованием «водных электродов»: лист помещался между двух емкостей, заполненных водой до определенного уровня, чтобы можно было однозначно оценить площадь контакта воды с диэлектриком и визуально контролировать отсутствие газовых полостей. На втором этапе диск помещался в штатную электродную систему (рис. 1), за тем исключением, что оба электрода касались диэлектрического барьера.

Электроды обладали полированной поверхностью, горение разряда на периферии электродов исключалось нанесением слоя кремнийорганического вазелина. На рис. 4 приведены зависимости измеренных активных потерь на каждом из этапов эксперимента.

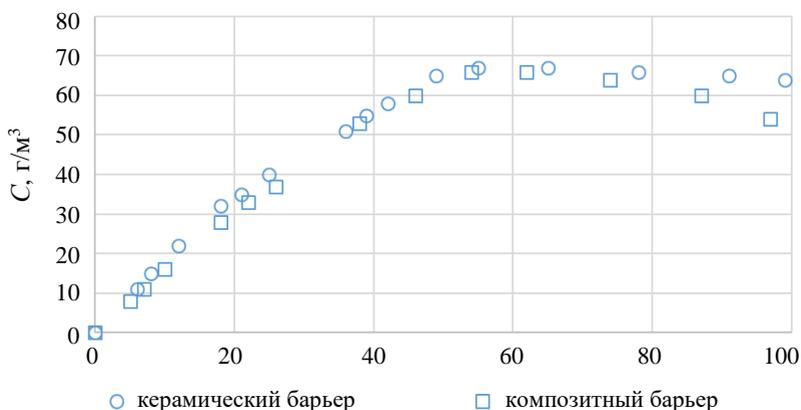


**Рис. 4. Активные потери в генераторе озона при отсутствии полезного разряда**  
**Fig. 4. Active losses in ozone generator at absence of useful discharge**

Из зависимостей видно, что при приложении напряжения непосредственно к диэлектрику (маркер  $\circ$ ) уровень потерь находится на достаточно низком уровне и имеет четко выраженную квадратичную зависимость. В случае же использования металлических электродов (маркер  $\Delta$ ) при достижении определенного уровня напряжения зависимость приобретает более крутой вид и при напряжениях, характерных рабочим напряжениям генератора озона, потери кратно превосходят потери в чистом диэлектрике. Можно предположить, что данное превышение происходит как раз из-за наличия разрядных явлений в пространстве между диэлектрическим барьером и металлическим электродом, размер которых достаточен для развития разрядов, несмотря на полировку электродов. Правомерность сравнения уровня потерь основана на отсутствии в генераторах озона диэлектрических потерь, отличимых от потерь основной частоты [18].

На третьем этапе эксперимента в качестве барьера использовался композитный диэлектрический барьер. Результаты измерения потерь также представлены на рис. 4 (маркер  $\square$ ). Видно, что потери значительно снижаются по сравнению с конструкцией с чисто керамическим электродом, но несколько превышают «идеальный» случай чистых потерь в барьере. Причины превышения могут крыться в неполном отсутствии воздушных включений в композите и в увеличении тангенса угла диэлектрических потерь в композитном диэлектрике.

На последнем этапе работы сравнивались кинетические кривые синтеза озона (зависимости концентрации вырабатываемого озона от вложенной в разряд мощности) в конструкции с чисто керамическим и с композитным барьером. Расход кислорода в обоих случаях составлял 1 л/мин, результаты сравнения приведены на рис. 5. Полученные зависимости практически идентичны на стадии роста концентрации озона и начинают расходиться при больших значениях вложенной мощности. Совпадение зависимостей при мощностях до 60 Вт можно объяснить незначительным вкладом потерь в диэлектрике и газовых полостях на фоне принципиально больших значений полезной мощности разряда, а дальнейшее расхождение, по-видимому, связано с более эффективным отводом тепла из разрядной области через композитный барьер, поскольку именно тепловое разложение озона является причиной спада кинетических кривых [18-20].



**Рис. 5. Кинетические кривые синтеза озона при различных типах диэлектрического барьера**

**Fig. 5. Kinetic curves of ozone synthesis at different types of dielectric barrier**

Несмотря на незначительное, пусть и положительное, влияние применения композитного диэлектрического барьера на эффективность синтеза озона, существует ряд преимуществ применения такого метода: отсутствие необходимости дополнительной обработки металлических электродов и жесткая фиксация положения диэлектрического барьера в пространстве за счет высокой адгезии к электроду. Из минусов же стоит отметить достаточно трудоемкий и технически сложный процесс создания композитного диэлектрического компаунда и его нанесения на металлический электрод.

#### IV. Выводы

Предложен способ снижения нежелательных потерь мощности в электротехнологических установках на барьерном разряде за счет создания композиционных диэлектрических барьеров.

Показано, что предложенная конструкция композиционного диэлектрического барьера устраняет возможность смещения различных узлов конструкции относительно друг друга за счет высокой адгезии промежуточного диэлектрического слоя как к металлу, так и к керамике.

Оценено влияние точности обработки металлических электродов на степень адгезии к ним промежуточного диэлектрического слоя. Показано, что при применении такого барьера пропадает необходимость полировки электродов, что снижает конечную стоимость изделий.

Показано, что применение предложенного композиционного диэлектрического барьера не снижает эффективности синтеза озона, а в области больших мощностей даже дает положительный эффект.

*Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FSWF-2024-0004)*

© Лысов Н.Ю., 2024

© Клубков А.В., 2024

© Нестеренко А.А., 2024

© Акинин Н.А., 2024

*Поступила в редакцию 03.10.2024*

*Принята к публикации 16.10.2024*

*Received 03.10.2024*

*Accepted 16.10.2024*

#### Библиографический список

- [1] Kogelschatz U., Eliasson B., Egli W. From ozone generators to flat television screens: history and future potential of dielectric-barrier discharges // Pure and Applied Chemistry. 1999. № 71 (10). P. 1819-1828. DOI: 10.1351/pac199971101819
- [2] Loeb B.L., Thompson C.M., Drago J., Takahara H., Baig S. Worldwide ozone capacity for treatment of drinking water and wastewater: a review // Ozone: Science and Engineering. 2012. № 34 (1). P. 64-77. DOI: 10.1080/01919512.2012.640251
- [3] Сторчай Е.И., Смородин А.И., Лантушенко Л.С., Лантушенко Ю.Н., Голубева И.В. Генераторы озона с электродами нового поколения и способ их изготовления // 33-й Всерос. науч.-практ. семинар «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии», Июнь 25-26, 2014, Москва, Россия. М.: ООО «МАКС Пресс», 2014. С. 10-21.

- [4] Murata T., Tatsukawa M., Okita Y., Yasuoka K. Polarity effect of silent discharge // Ozone: Science and Engineering. 1995. № 17 (5). P. 575-585. DOI: 10.1080/01919512.1995.10555768
- [5] Okita Y., Amano A., Nouda K., Murata T., Terai K. Effects of the cooling method on ozone generation // Proceedings of 13th Ozone World Congress, 1997, Kyoto, Japan. P. 847-852.
- [6] Самойлович В.Г., Панин В.В., Крылова Л.Н. Современные тенденции в конструировании промышленных озонаторов // Первая Всерос. конф. «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии», Июнь 7-9, 2005, Москва, Россия. М.: 2005. С. 138.
- [7] Кравченко Г.А., Макаров А.М., Пичугин Ю.П. Оценка ресурса системы высоковольтных электродов генератора озона с многослойным диэлектрическим барьером // Вестник Чувашского университета. 2013. № 3. С. 193-196.
- [8] Петцольд А., Пёшманн Г. Эмаль и эмалирование. М.: Металлургия, 1990. – 576 с.
- [9] Варгин В.В. Эмалирование металлических изделий. Л.: Машиностроение, 1972. – 495 с.
- [10] Кожин В.Ф., Кожин И.В. Озонирование воды. М.: Стройиздат, 1974. – 160 с.
- [11] Ливке В.А., Плысюк А.А., Бондарь П.Г. Способ получения озона. Патент SU 477940 А1, заявл. 25.09.1972; опубл. 25.07.1975.
- [12] ГОСТ 6433.4-71. Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости при частоте 50 Гц. Введ. 1972-07-01. М.: Издательство стандартов, 1972. – 19 с.
- [13] ГОСТ 23372-77. Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 до  $5 \cdot 10^6$  Гц. Введ. 1978-01-01. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1978. – 19 с.
- [14] ГОСТ 23630.2-79. Пластмассы. Метод определения теплопроводности. Введ. 1981-07-01. 1981. – 8 с.
- [15] Кузин В.В., Фёдоров С.Ю. Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности  $Al_2O_3$ -керамики // Новые огнеупоры. 2016. № 7. С. 65-70. DOI: 10.17073/1683-4518-2016-7-65-70
- [16] ГОСТ 14759-69. Клеи. Метод определения прочности при сдвиге. Введ. 1970-01-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 1970. – 13 с.
- [17] Пашин М.М., Лысов Н.Ю. Измерение энергозатрат в озонаторах с объемным барьерным разрядом // Электричество. 2011. № 12. С. 21-26.
- [18] Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. М.: Издательство Московского университета, 1987. – 237 с.
- [19] Лунин В.В., Самойлович В.Г., Ткаченко С.Н., Ткаченко И.С. Теория и практика получения и применения озона. М.: Издательство Московского университета, 2016. – 416 с.
- [20] Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. М.: Изд-во МГУ, 1989. – 176 с.

## References

- [1] U. Kogelschatz, B. Eliasson and W. Egli, "From ozone generators to flat television screens: history and future potential of dielectric-barrier discharges", *Pure and Applied Chemistry*, vol. 71, no. 10, pp. 1819-1828, Oct. 1999. DOI: 10.1351/pac199971101819
- [2] B.L. Loeb, C.M. Thompson, J. Drago, H. Takahara and S. Baig, "Worldwide ozone capacity for treatment of drinking water and wastewater: a review", *Ozone: Science and Engineering*, vol. 34, no. 1, pp. 64-77, Jan. 2012. DOI: 10.1080/01919512.2012.640251
- [3] E.I. Storchay, A.I. Smorodin, L.S. Lantushenko, Yu.N. Lantushenko and I.V. Golubeva, "Generatory ozona s elektrodami novogo pokoleniya i sposob ih izgotovleniya [Ozone generator with new generation electrodes and method of their manufacture]", in proc. *33rd All-Russian scientific and practical seminar Ozon i drugie ekologicheski chistye okisliteli. Nauka i tekhnologii [Ozone and other environmentally friendly oxidizers. Science and technology]*, June 25-26, 2014, Moscow, Russia, pp. 10-21 (in Russian).
- [4] T. Murata, M. Tatsukawa, Y. Okita and K. Yasuoka, "Polarity effect of silent discharge", *Ozone: Science and Engineering*, vol. 17, no. 5, pp. 575-585, 1995. DOI: 10.1080/01919512.1995.10555768
- [5] Y. Okita, A. Amano, K. Nouda, T. Murata and K. Terai, "Effects of cooling method on ozone generation", in proc. *13th Ozone World Congress*, 1997, Kyoto, Japan, pp. 847-852.
- [6] V.G. Samoylovich, V.V. Panin and L.N. Krylova, "Sovremennye tendencii v konstruirovanii promyshlennykh ozonatorov [Modern trends in the design of industrial ozonizers]", in proc. *First All-Russian conf. "Ozon i drugie ekologicheski chistye okisliteli. Nauka i tekhnologii posvyashchennaya [Ozone and other environmentally friendly oxidizers. Science and technology]"*, June 7-9, 2005, Moscow, Russia, p. 138 (in Russian).
- [7] G.A. Kravchenko, A.M. Makarov and Yu.P. Pichugin, "Resource assessment of ozone generator high voltage electrodes with multilayer dielectric barrier", *Vestnik Chuvashskogo Universiteta*, no. 3, pp. 193-196, 2013.
- [8] A. Pettsol'd and G. Poshmann, *Emal' i emalirovaniye [Enamel and enameling]*. Moscow: Metallurgy, 1990 (in Russian).
- [9] V.V. Vargin, *Emalirovanie metallicheskih izdelij [Enameling of metal products]*. Leningrad: Mashinostroenie, 1972 (in Russian).
- [10] V.F. Kozhinov and I.V. Kozhinov, *Ozonirovaniye vody [Ozonation of water]*. Moscow: Stroyizdat, 1974 (in Russian).
- [11] V.A. Livke, A.A. Plysyuk and P.G. Bondar'. *Sposob polucheniya ozona [Method for producing ozone]*. Patent SU 477940 A1, July 25, 1975 (in Russian).
- [12] Solid electrical insulating materials. Methods for evaluation of dielectric power factor and permittivity at power (50 Hz) frequency, GOST 6433.4-71, July 1972.
- [13] Dielectric materials. Methods of determination of permittivity and powerfactor with in a frequency range of 100 to 5  $10^6$  Hz, GOST 23372-77, January 1978.
- [14] Plastics. Method for the determination of thermal conductivity, GOST 23630.2-79, July 1981.

- [15] V.V. Kuzin and S.Yu. Fedorov, "Correlation between the diamond grinding condition and surface state of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-base ceramics", *Novye Ogneupory (New Refractories)*, no. 7, pp. 65-70, 2016. DOI: 10.17073/1683-4518-2016-7-65-70
- [16] Adhesives. Method of determination of shear strength, GOST 14759-69, Jan. 1970.
- [17] M.M. Pashin and N.Yu. Lysov, "Izmereniye energozatrat v ozonatorakh s ob'yemnym bar'yernym razryadom [Measurement of energy consumption in ozonizers with volume barrier discharge]", *Electricity*, no. 12, pp. 21-26, 2011 (in Russian).
- [18] Yu.V. Filippov, V.A. Voblikova and V.I. Panteleev, *Elektrosintez ozona [Electrosynthesis of ozone]*. Moscow: Moscow University Publishing House, 1987 (in Russian).
- [19] V.V. Lunin, V.G. Samoylovich, S.N. Tkachenko and I.S. Tkachenko, *Teoriya i praktika polucheniya i primeneniya ozona [Theory and practice of obtaining and using ozone]*. Moscow: Moscow University Publishing House, 2016 (in Russian).
- [20] V.G. Samoylovich, V.I. Gibalov and K.V. Kozlov, *Fizicheskaya khimiya bar'yernogo razryada [Physical chemistry of barrier discharge]*. Moscow: Moscow State University Publishing House, 1989 (in Russian).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Лысов Николай Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

**Nikolay Yu. Lysov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the National Research University MPEI, Moscow, Russian Federation.

**Клубков Александр Владимирович**, аспирант Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

**Aleksandr V. Klubkov**, postgraduate student of the National Research University MPEI, Moscow, Russian Federation.

**Нестеренко Александр Алексеевич**, инженер-исследователь Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

**Alexander A. Nesterenko**, research engineer of the National Research University MPEI, Moscow, Russian Federation.

**Акинин Никита Алексеевич**, лаборант-исследователь Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

**Nikita A. Akinin**, laboratory research assistant of the National Research University MPEI, Moscow, Russian Federation.

**ХРОНИКА**

---

**СТЕПАНОВУ ВАЛЕНТИНУ ПАВЛОВИЧУ  
80 ЛЕТ**

17 октября 2024 г. исполнилось 80 лет доктору технических наук, профессору Валентину Павловичу Степанову.

Валентин Павлович окончил Куйбышевский политехнический институт по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий» в 1968 г. Обучался в аспирантуре Ждановского металлургического института под руководством д-ра техн. наук, профессора И.В. Жежеленко. Кандидатскую диссертацию защитил в 1981 г. в Белорусском политехническом институте, докторскую – в 1999 г. в Московском энергетическом институте.

Пройдя все ступени педагогических должностей (ассистент, старший преподаватель, доцент, профессор), с 1992 по 2019 г. он возглавлял кафедру «Автоматизированные электроэнергетические системы» Самарского государственного технического университета. С 2006 по 2012 гг. Валентин Павлович был деканом Электротехнического факультета СамГТУ. Благодаря его активному участию здесь были открыты учебные центры «СамГТУ-Электроцит» и «СамГТУ-Шнейдер Электрик».

По инициативе и при активном участии В.П. Степанова на кафедре была открыта аспирантура по специальностям «Электрические станции и электроэнергетические системы» и «Электротехнические комплексы и системы». В 2001 г. он организовал диссертационный совет по защите кандидатских и докторских диссертаций, в котором стал вначале заместителем председателя, а с 2006 г. по 2012 г. – председателем.

Валентин Павлович является основателем научно-педагогической школы «Электромагнитная совместимость и энергоэффективность в электротехнических комплексах и системах». В рамках этой научно-педагогической школы с 2002 г. по настоящее время на кафедре подготовлено и защищено 5 диссертаций на соискание ученой степени доктора технических наук и 23 диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В.П. Степанов известен в России и за рубежом как крупный ученый в области проблем расчета электрических нагрузок и энергосберегающих технологий в проектировании систем электроснабжения. Он является автором нескольких монографий и большого числа статей в научно-технических журналах.

За успешную научно-педагогическую деятельность Валентин Павлович Степанов награжден ведомственными наградами Российской Федерации.

*Редколлегия и редакция  
журнала «Интеллектуальная электротехника»  
сердечно поздравляют Валентина Павловича,  
желают ему здоровья и успехов!*

**MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION  
OF THE RUSSIAN FEDERATION  
NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY  
n.a. R.E. ALEKSEEV**

# **SMART ELECTRICAL ENGINEERING**

**№ 4**

**Nizhny Novgorod 2024**

*The journal is issued 4 times in year*

**Editor-in-Chief A.B. Loskutov**

**EDITORIAL STAFF**

A.B. Dar'enkov (associate Editor-in-Chief),  
E.N. Sosnina (associate Editor-in-Chief), A.V. Shalukho (executive secretary),  
V.I. Kazakova (executive editor), I.A. Lipuzhin (executive editor)

**MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:**

Dauren Sadykovich Akhmetbaev	Doctor of technical sciences, associate professor of the S. Seifullin Kazakh Agro-Technical University (Astana, Republic of Kazakhstan)
Gennadiy Yakovlevich Vagin	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Leonid Abramovich German	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU Branch in Nizhny Novgorod (Nizhny Novgorod, Russia)
Valery Gennadievich Goldstein	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU (Samara, Russia)
Igor Vasilevich Gulyaev	Doctor of technical sciences, professor, professor MRSU (Saransk, Russia)
Pavel Vladimirovich Ilyushin	Doctor of technical sciences, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Alexander Leonidovich Kulikov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Viktor Nikolaevich Mescheryakov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair LSTU (Lipetsk, Russia)
Aleksandr Sergeevich Plekhov	Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Aleksandr Yur'evich Smirnov	Doctor of technical sciences, associate professor, leading design engineer JSC «Afrikantov OKBM» (Nizhny Novgorod, Russia)
Vladimir Georgievich Titov	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Oleg Stanislavovich Khvatov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair FFEI HE «VSUWT» (Nizhny Novgorod, Russia)
Yuriy Ivanovich Khokhlov	Doctor of technical sciences, professor, professor FSAEIH SUSU (NRU) (Chelyabinsk, Russia)
Alexandr Ivanovich Chivenkov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)

*Electronic version:*  
<http://www.ie.nntu.ru>

*Periodic printed edition registered by Roskomnadzor*  
*ПИ № ФС77-81688 on 06 Aug., 2021*

## CONTENT

<b>ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS .....</b>	<b>4</b>
<b>A.Y. Smirnov, D.A. Ulyanov, P.A. Stasyuk, T.N. Usnunts-Kriger.</b> Design of inductor motors for driving emergency protection mechanisms of nuclear reactors.....	<b>4</b>
<b>D.Y. Platonov, E.A. Krotkov, V.P. Stepanov.</b> Modeling calculated electrical load of seaport loading crane.....	<b>21</b>
<b>E.L. Ryzhova, V.Yu. Osipov.</b> Technical diagnostics of rectifier inverter converter in regenerative braking mode when using electropneumatic brakes of electric rolling stock.....	<b>31</b>
<b>Ya.K. Starostina, A.D. Tokarev, D.D. Posnov.</b> Use of network regulators in automated electric drive control systems.....	<b>47</b>
<b>A.I. Beloshistov, A.L. Serov, A.A. Beloshistov.</b> Microprocessor-based leakage current protection device for 36(42) V circuits.....	<b>58</b>
<b>D.B. Petlenko, E.A. Avdonin.</b> Application of quantum magnetometers in magnetic exploration using unmanned systems.....	<b>71</b>
<b>POWER INDUSTRY .....</b>	<b>86</b>
<b>D.I. Kovalev, V.N. Varivodov, D.V. Golubev, S.A. Elfimov, S.S. Zhulikov.</b> Optimization calculation of electrophysical parameters of switchgear with polymer-gas insulation.....	<b>86</b>
<b>N.Yu. Lysov, A.V. Klubkov, A.A. Nesterenko, N.A. Akinin.</b> Application of composite materials in high-voltage electrotechnological installations based on dielectric barrier discharge.....	<b>100</b>
<b>CRONICLE .....</b>	<b>114</b>
80th anniversary of the birth of Valentin Pavlovich Stepanov.....	<b>114</b>

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

**№ 4**

Редакторы: **В.И. Казакова, И.А. Липужин**  
Технический редактор: **И.Н. Терентьева**

*Редакция:*

603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24  
smart\_electric@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать 09.12.2024. Дата выхода в свет: 20.12.2024

Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 8,75. Тираж 100 экз. Заказ .

---

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева. Типография НГТУ.

Адрес университета и типографии:  
603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24