

Издается с ноября 2013 года  
Выходит один раз в квартал

№ 3 (32)  
Сентябрь 2021

# ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛЬ – САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю.А.

Журнал включён в перечень ведущих рецензируемых научных журналов,  
рекомендованных для публикаций Высшей аттестационной комиссией  
Минобрнауки России

<b>Главный редактор</b>	<b>КАЛГАНОВА СВЕТЛАНА ГЕННАДЬЕВНА</b> д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
<b>Зам. главного редактора</b>	<b>БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ</b> д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
<b>Научный редактор</b>	<b>АРТЮХОВ ИВАН ИВАНОВИЧ</b> д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
<b>Ответственный секретарь</b>	<b>ЮДИНА ВИОЛЕТТА ОЛЕГОВНА</b> ассистент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

## Редакционная коллегия

<b>В.В. ВАХНИНА</b>	д.т.н., профессор, Тольяттинский государственный университет, Тольятти
<b>Ю.В. ГУЛЯЕВ</b>	д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН, Москва
<b>В.Б. ДЕМИДОВИЧ</b>	д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург
<b>Л.С. ЗИМИН</b>	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
<b>А.А. ЗАХАРОВ</b>	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
<b>Ю.Б. КАЗАКОВ</b>	д.т.н., профессор, ИГЭУ, Иваново
<b>А.Н. МАКАРОВ</b>	д.т.н., профессор, ТвГТУ, Тверь
<b>Г.А. МОРОЗОВ</b>	д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ имени А.Н. Туполева, Казань
<b>Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН</b>	д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза
<b>А.Ф. РЕЗЧИКОВ</b>	д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, ИПТМУ РАН, Саратов
<b>И.В. РОДИОНОВ</b>	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
<b>Ф.Н. САРАПУЛОВ</b>	д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург
<b>Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ</b>	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
<b>А.А. ФОМИН</b>	д.т.н., СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
<b>В.Н. ХМЕЛЕВ</b>	д.т.н., профессор, БТИ, Бийск
<b>В.А. ЦАРЕВ</b>	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013  
Published Quarterly

№ 3 (32)  
September 2021

# JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

## Scientific and Technical Publication

The journal is founded by Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

The journal is included in the List peer-reviewed scientific publications, recommended for publication by the Higher Attestation Commission of the Ministry of education and science Russia

<b>Editor-in-Chief</b>	<b>KALGANOVA SVETLANA GENNADIEVNA</b> Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
<b>Assistant to the Editor-in-Chief</b>	<b>BEKRENEV NIKOLAY VALERIEVICH</b> Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
<b>Scientific editor</b>	<b>ARTYUKHOV IVAN IVANOVICH</b> Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
<b>Chief Executive Officer</b>	<b>YUDINA VIOLETTA OLEGOVNA</b> Assistant, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

## Editorial Board Members

<b>V.V. VAKHNINA</b>	Dr.Sc., Professor, Togliatti State University, Togliatti
<b>Yu.V. GULYAEV</b>	Dr.Sc., Professor, Academician of RAS, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow
<b>V.B. DEMIDOVICH</b>	Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI», St. Petersburg
<b>L.S. ZIMIN</b>	Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University, Samara
<b>A.A. ZAKHAROV</b>	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
<b>Yu.B. KAZAKOV</b>	Dr. Sc., Professor, Ivanovo State Power University, Ivanovo
<b>A.N. MAKAROV</b>	Dr.Sc., Professor, Tver State Technical University, Tver
<b>G.A. MOROZOV</b>	Dr.Sc., Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan
<b>Yu.P. PERELIGIN</b>	Dr.Sc., Professor, Penza State University, Penza
<b>A.F. REZCHIKOV</b>	Dr.Sc., Professor, Corresponding Member of RAS, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov
<b>I.V. RODIONOV</b>	Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
<b>F.N. SARAPULOV</b>	Dr.Sc., Professor, Ural Federal University, Ekaterinburg
<b>Yu.B. TOMASHEVSKY</b>	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
<b>A.A. FOMIN</b>	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov
<b>V.N. KHMELEV</b>	Dr.Sc., Professor, Biysk Technological Institute, Biysk
<b>V.A. TSAREV</b>	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

---

ISSN 2309-6020

© Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

<b>Зязев М.Е., Гиззатуллин Э.В., Коняев А.Ю.</b> Моделирование и исследование движения проводя- щих частиц при сепарации в бегущем магнитном поле.....	5
<b>Казаков Ю.Б., Страдомский Ю.И., Филиппов В.А., Нестеров С.А.</b> Уточненный электромагнитный анализ магнитожидкостных сепарато- ров немагнитных материалов.....	15
<b>Осипова Е.О., Маркелова О.А., Кошура В.А., Фомин А.А.</b> Исследование влияния тока индукто- ра на структуру и механические свойства газотермических титановых покрытий.....	27

### ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

<b>Гайнуллина Л.Р., Фасыхов А.Р.</b> Влияние механических примесей на электрическую прочность трансформаторного масла.....	33
<b>Кузнецова Ю.А., Ясинский В.Б., Коробейников С.М.</b> Методика моделирования предпробивных полей в жидкости.....	38
<b>Скворцов О.Б., Стащенко В.И., Троицкий О.А.</b> Силовое механиче- ское воздействие электроимпульсов на проводник.....	48

### ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

<b>Доманов В.И., Мурзаков Д.Г., Халиуллов Д.С.</b> Математическая модель асинхронного двигателя с фазным ротором в системе коорди- нат d-q.....	57
--	----

### ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<b>Чупрыненко М.И., Горячевский К.С.</b> Реализация защиты от дуговых замыканий в условиях цифровой подстанции.....	65
<b>Козловский В.Н., Саксонов А.С.</b> Компьютерное моделирование влияния технологических особенно- стей формирования эллипсности статора на электромеханические характеристики автомобильной синхронной генераторной установки.....	74
<b>Андреев А.А.</b> Исследование переход- ного процесса в электрических сетях среднего напряжения с замыканием на землю.....	81
<b>Александрович С.А., Зорина Т.Г.</b> Совершенствование тарифов на энергоресурсы Республики Бела- русь с целью стимулирования увели- чения доли электрической энергии в балансе энергоснабжения зданий.....	91
К сведению авторов.....	103

## CONTENTS

### **ELECTRICAL ENGINEERING**

---

- Zyazev M.E., Gizzatullin E.V., Konyaev A.Yu.** Modeling and research into motion of conducting particles under separation in the traveling magnetic field ..... 5
- Kazakov Yu.B., Stradomsky Yu.I., Filippov V.A., Nesterov S.A.** Updated electromagnetic analysis of separators with magnetic fluids for non-magnetic materials .....15
- Osipova E.O., Markelova O.A., Koshuro V.A., Fomin A.A.** Effects of inductor current on the structure and mechanical properties of thermal spray coatings on titanium.....27

### **ELECTRICAL MATERIALS AND PRODUCTS**

---

- Gaynullina L.R., Fasykhov A.R.** Influence of mechanical impurities on dielectric strength of transformer oil .....33
- Kuznetsova Yu.A., Yassinskiy V.B., Korobeynikov S.M.** Simulation of pre-breakdown fields in liquids .....38
- Skvortsov O.B., Stashenko V.I., Troitsky O.A.** Mechanical effects of electrical impulses on the conductor.....48

### **ELECTROMECHANICS**

---

- Domanov V.I., Murzakov D.G., Khaliullof D.S.** Mathematical model of an induction motor with a wound rotor in the d-q coordinate system..... 57

### **ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS**

---

- Chuprynenko M.I., Goryachevsky K.S.** Implementation of arc-fault protection in a digital substation area..... 65
- Kozlovskiy V.N., Saksonov A.S.** Computer modeling for effects of technological characteristics in forming stator ellipticity on electromechanical properties of vehicular synchronous generators..... 74
- Andreev A.A.** Investigation of the transient process in medium-voltage electrical networks with a ground fault ..... 81
- Aliaksandrovich S.A., Zorina T.G.** Improvement of energy tariffs in the Republic of Belarus in order to stimulate an increase in the share of electricity in the energy balance system of buildings..... 91
- Information for Authors ..... 103

---

# ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.313.17:621.928.1

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПРОВОДЯЩИХ ЧАСТИЦ ПРИ СЕПАРАЦИИ В БЕГУЩЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

М.Е. Зязев, Э. В. Гиззатуллин, А.Ю. Коняев

## MODELING AND RESEARCH INTO MOTION OF CONDUCTING PARTICLES UNDER SEPARATION IN THE TRAVELING MAGNETIC FIELD

M.E. Zyazev, E.V. Gizzatullin, A.Yu. Konyaev

*При промышленной переработке твердых для извлечения частиц цветных металлов применяется электродинамическая сепарация в бегущем магнитном поле. В статье рассмотрены электродинамические сепараторы на основе линейных индукторов при подаче отходов по ленте конвейера. В статье показано, что на стадии проектирования сепаратора необходимо рассчитывать траектории движения сепарируемых частиц. Отмечены трудности такого расчета. Представлена математическая модель для исследования электродинамического сепаратора на основе линейного индуктора. Важной частью модели являются уравнения для комбинированного воздействия на частицу электромагнитных и механических сил, величина которых корректируется в ходе расчета. В модели учитывается движение проводящих частиц в двух направлениях: перенос частиц по ленте конвейера и поперечное движение под действием электромагнитных сил. Описаны результаты исследований промышленного образца сепаратора. Результаты расчетов хорошо согласуются с результатами промышленных испытаний.*

*The procedure of electrodynamic separation in the travelling magnetic field is used in industrial processing of solids applied for extraction of particles of non-ferrous metals. The article considers electrodynamic separators based on linear inductors applied when the waste is fed onto the conveyor belt. The article shows the necessity to calculate the trajectories of separated particles at the design stage of such separators. The focus is made on the challenges related to the calculation procedure. The authors present a mathematical model for the study of electrodynamic separators based on linear inductors. An important part of the model are equations related to electromagnetic and mechanical forces producing a combined effect on the particle, with the value corrected in the course of calculations. The model takes into account the movement of conducting particles in two directions: the transfer of particles along the conveyor belt and lateral movement under the influence of electromagnetic forces. The research results of an industrial sample of a separator are described. The calculation results are compatible with the results of industrial tests.*

Ключевые слова: *переработка твердых отходов, электродинамическая сепарация, электромагнитные и механические силы, математическая модель, результаты исследований*

Keywords: *solid waste processing, electrodynamic separation, electromagnetic and mechanical forces, mathematical model, research results*

В настоящее время одной из важнейших задач в нашей стране является развитие промышленной переработки твердых отходов, прежде всего твердых коммунальных отходов (ТКО) и близких к ним по компонентному составу смешанных промышленных отходов [1, 2]. Стратегия развития формируемой отрасли предполагает уменьшение доли полигонного захоронения отходов и максимальную степень извлечения из них отдельных компонентов, пригодных для использования в качестве вторичного сырья. Для решения указанных задач необходимо создание технологий, обеспечивающих выделение из потока отходов ресурсоценных фракций. Наиболее ценными компонентами любых твердых отходов являются металлы, извлечение которых является обязательным при любом способе переработки. Извлечение металлов и последующая их реализация в качестве вторичного сырья позволяет улучшить экономические показатели переработки отходов. Кроме того, обеспечивается безава-

рийная работа технологического оборудования и улучшается качество товарных продуктов переработки отходов [3-4]. Для выделения из отходов включений черных металлов широко используются серийно выпускаемые магнитные сепараторы – железоотделители (шкивного, либо подвесного типа), с помощью которых можно обеспечить стопроцентное выделение ферромагнитной фракции. Извлечение из отходов немагнитных цветных металлов – задача более сложная. В мировой практике для решения этой задачи чаще всего используются электродинамические сепараторы (по принятой за рубежом терминологии: *eddy-current separators* – вихретоковые сепараторы) [5-9]. Такие сепараторы работают по принципу асинхронного электродвигателя. При этом роль вторичного элемента двигателя выполняют извлекаемые частицы металлов. Основные варианты электродинамических сепараторов представлены на рис. 1.

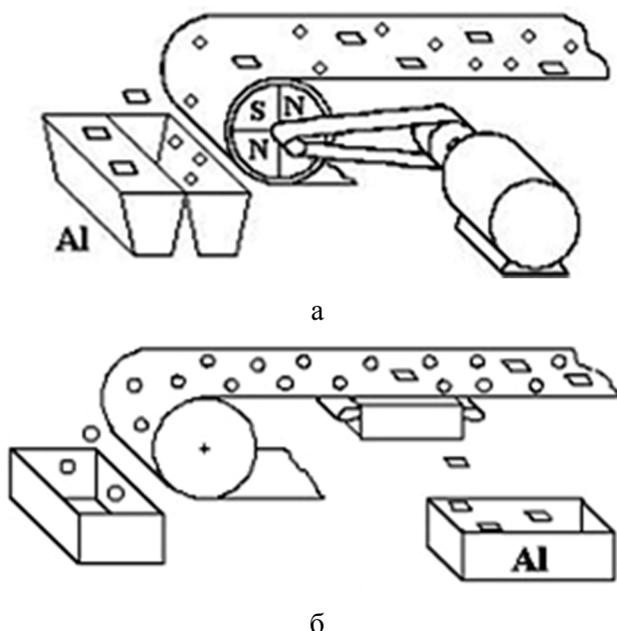


Рис. 1. Электродинамические сепараторы с индуктором на основе постоянных магнитов (а) и на основе трехфазного линейного индуктора (б)

Наибольшее распространение получили сепараторы с вращающимся магнитным полем, создаваемым индуктором на основе постоянных магнитов (рис. 1 а), и сепараторы с бегущим магнитным полем, возбуждаемым трехфазными линейными индукторами (рис. 1 б). В сепараторах с постоянными магнитами могут создаваться магнитные поля с частотами от 50 до 500 Гц, получаемыми за счет изменения скорости приводного двигателя. Такие сепараторы отличаются малым энергопотреблением. В то же время для них требуется подача материала монослоем, что ограничивает производительность установок. Более простую конструкцию и большую производительность имеют сепараторы на основе линейных индукторов, которые легко встраиваются в действующие технологические линии и позволяют извлекать металлические включения из слоя отходов.

С появлением высокоэффективных постоянных магнитов в технологиях переработки отходов чаще стали использоваться электродинамические сепараторы первого типа [5-8]. В то же время высокопроизводительные сепараторы на основе линейных индукторов во многих случаях могут оказаться предпочтительнее. Исследования и разработки таких сепараторов многие годы ведутся в Уральском федеральном университете (УрФУ). В частности, для предприятий по переработке твердых отходов в УрФУ в содружестве с институтом «Гипрокоммунстрой» (Санкт-Петербург) и ОАО «Уралэнергоцветмет» (Екатеринбург) были разработаны и созданы сепараторы КМ-203М [9-11]. Опыт УрФУ показывает, что возможности сепараторов на основе линейных индукторов далеко не исчерпаны, поэтому совершенствование их конструкций и повышение технологической и энергетической эффективности таких сепараторов на основе изучения физических процессов в них продолжают оставаться актуальными. Особенности моделирования электродинамических сепараторов на основе линейных индукторов и некоторые результаты исследований рассматриваются в данной статье.

Оценка морфологического состава ТКО показывает, что в них содержится от 0,8 до 1,5 % (по массе) цветных металлов, представленных преимущественно алюминиевыми сплавами, из которых изготавливаются изделия пищевого назначения и различные потребительские товары [3, 12]. Анализ физических свойств таких сплавов показывает, что их удельная электропроводность (наиболее значимый для электродинамической сепарации показатель) изменяется от 18 МСм/м (сплав АК12) до 34 МСм/м (сплав АД1). С учетом этого были рассчитаны зависимости удельных электромагнитных усилий (отношение усилия к массе частицы,  $F_m = F_{эм} / m$ , Н/кг или м/с<sup>2</sup>) от крупности сепарируемых проводящих частиц. Для расчета удельных электромагнитных усилий использовалась хорошо апробированная методика, разработанная в УрФУ [4, 13]. Достоинством методики является учет перераспределения вторичных токов, обусловленного ограниченностью размеров вторичного элемента. В то же время в методике используется упрощающее допущение, предполагающее существование в линейном индукторе только бегущей составляющей магнитного поля и не позволяющее учесть неравномерность распределения электромагнитных усилий по длине машины. Благодаря такому допущению удалось получить аналитические выражения для электромагнитных усилий и выполнять расчеты в математическом пакете Mathcad. Методика удобна для многовариантных поисковых расчетов. При поверочных расчетах конкретных вариантов сепаратора необходимо применять более строгие численные методы (например, в пакетах Elcut или ANSYS).

Расчеты усилий выполнены для квадратных пластин ( $a = b$ , где  $b$  – размер пластины в направлении движения магнитного поля,  $a$  – размер в поперечном направлении) при неизменной толщине  $d = 2$  мм (изменение формы и толщины частиц может быть учтено в дальнейшем). За основу расчетов были взяты параметры сепаратора КМ-203М: односторонний линейный индуктор имеет полюсное деление  $\tau = 0,186$  м, ширину актив-

ной зоны  $L_u = 350$  мм, питается от стандартной сети (напряжение  $U_n = 380$  В, частота  $f = 50$  Гц), амплитуда линейной плотности тока  $J_{nm} = 110$  кА/м. Рассчитывались пусковые электромагнитные усилия (скольжение  $s = 1$ ), определяющие работоспособность

сепаратора. Рассматривались два положения сепарируемых частиц на конвейере: на поверхности ленты (удаление извлекаемой частицы от поверхности индуктора  $h = 0,01$  м) и на поверхности слоя отходов ( $h = 0,05$  м). Результаты расчетов представлены на рис. 2.

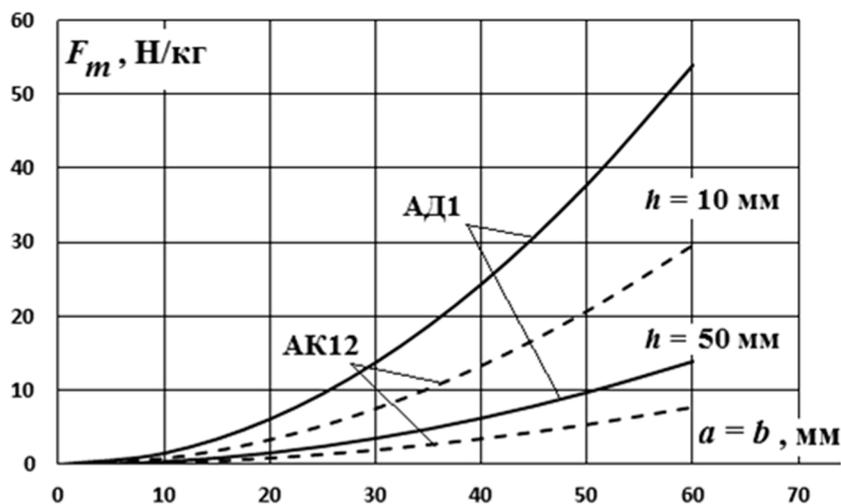


Рис. 2. Зависимости удельных электромагнитных усилий от крупности алюминиевых частиц

На рис. 2 нетрудно видеть, что удельное электромагнитное усилие, определяющее предельное ускорение, которое может получить извлекаемая проводящая частица, растет с увеличением крупности частиц. Поэтому в дальнейшем исследования были сосредоточены на оценке сепарации частиц с размерами менее 50 мм. При проектировании сепараторов КМ-203М их работоспособность оценивалась по величине требуемого для сепарации удельного усилия  $F_m = 6-8$  Н/кг, определенного экспериментально и заданного заказчиком [9]. Сравнение такого требуемого усилия с электромагнитными усилиями, показанными на рис. 2, позволяет говорить о возможности сепарации частиц с лучшей электропроводностью (сплав АД1) при размерах более 30 мм, а частиц с худшей электропроводностью (сплав АК12) при размерах более 50 мм. Частицы меньших размеров, особенно расположенные на поверхности слоя отходов, извлекаться не будут.

Однако исследования электродинамических сепараторов на основе линейных индукторов, выполненные в УрФУ, показали, что требуемое для сепарации удельное уси-

лие может существенно превышать указанное значение  $F_m = 6-8$  Н/кг [4]. Например, величина требуемого усилия возрастает при увеличении ширины конвейера  $B_k$  и скорости подачи отходов  $V_k$ . Сказанное означает, что определения развиваемых в сепараторе электромагнитных усилий для оценки его работоспособности недостаточно. Потребовалось создание методики расчета сепараторов, учитывающей совместное действие на проводящую частицу электромагнитных и конкурирующих с ними механических сил.

На рис. 3 показаны варианты криволинейных траекторий движения проводящих частиц в активной зоне сепаратора с односторонним выходом металла. Находясь над линейным индуктором, частица участвует одновременно в двух движениях: движется по конвейеру со скоростью  $V_k$  в направлении оси  $X$  и ускоренно – под действием электромагнитной силы в направлении оси  $Y$ . За пределами индуктора в направлении оси  $Y$  частица движется замедленно под действием сил инерции. При расчете траекторий движения необходимо учитывать силы сопро-

тивления движению (трение о ленту, сопротивление среды и т. п.). В простейшем случае (при рассмотрении одиночной частицы) сила сопротивления совпадает с силой трения  $F_{тр}$ , которая зависит от ко-

эффициента трения (например, для резиноканевой ленты  $k_{тр} = 0,35-0,40$ ). При наличии слоя отходов силу сопротивления можно оценивать увеличением  $k_{тр}$ , например, до уровня  $k_{тр} = 0,6-0,8$  [4].

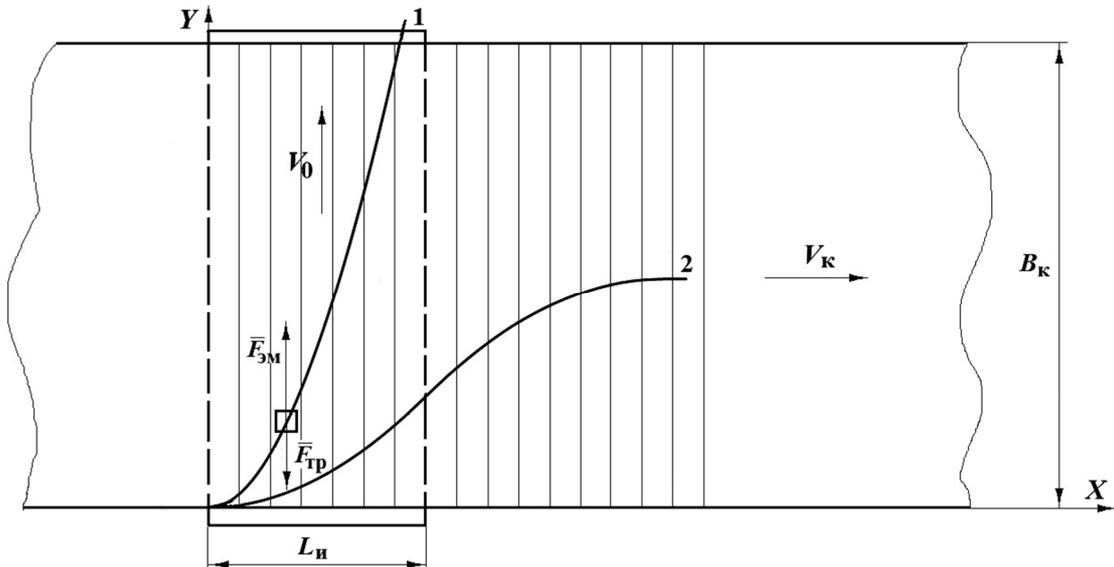


Рис. 3. Модель электродинамического сепаратора для расчета траекторий движения извлекаемых проводящих частиц

Представленные на рис. 3 траектории частиц для сепаратора с односторонним выходом металла показаны для худшего случая, когда частица, входящая в активную зону индуктора на правом краю ленты, должна преодолеть расстояние, равное ширине ленты конвейера  $B_k$ . Крупные частицы с хорошей электропроводностью под действием электромагнитных сил могут перемещаться за пределы ленты конвейера над индуктором (траектория 1). Частицы меньших размеров либо частицы с плохой электропроводностью могут не успевать переместиться за пределы конвейера и не извлекаются из потока отходов (траектория 2).

Для расчета траекторий движения частиц в сепараторе необходимо решить уравнение движения, которое в общем случае записывается в виде

$$F_{эм}(V, Y) - F_{сопр}(V) = m \frac{dV}{dt}. \quad (1)$$

Входящие в (1) электромагнитная сила  $F_{эм}$  и сила сопротивления движению  $F_{сопр}$

зависят от скорости движения частиц. Следует учитывать также неравномерность распределения электромагнитных сил по длине линейного индуктора (по оси  $Y$ ), обусловленную разомкнутостью магнитопровода. Все это делает уравнение (1) нелинейным и затрудняет его решение. Для преодоления указанных трудностей предлагается разбить зону сепарации в направлении оси  $X$  на участки шириной  $\Delta L = L_u/n$ , как показано на рис. 3, и полагать, что электромагнитное усилие и силы сопротивления в пределах участка остаются постоянными, изменяясь на границах участков. Такой подход позволяет на каждом участке решать линейное уравнение с определением параметров движения частиц (составляющих скорости и перемещения по координатам  $X$  и  $Y$  в конце участка). Получаемое в итоге решение соответствует кусочно-линейной аппроксимации реальной криволинейной траектории движения частицы. Количество участков разбиения  $n$  над индуктором для повышения точности расчетов должно быть

не менее 10. Шаг разбиения зоны сепарации за индуктором (по ходу движения конвейера) может быть произвольным, а количество таких участков определяется автоматически в ходе решения. Расчет траектории прекращается, когда скорость движения частицы в направлении оси  $Y$  станет равной нулю.

При решении уравнения (1) на каждом участке задаются начальные условия. Например, для первого участка задание начальных условий получается таким:

- координаты частицы на входе в участок: в худшем случае  $x = 0, y = 0$ ;
- начальная скорость частицы  $V_{X=0} = V_k$  и проекции скорости  $V_X = V_k; V_Y = 0$ ;
- пусковое электромагнитное усилие  $F_{эм0}$ , соответствующее положению частицы над линейным индуктором.

С учетом начальных условий для первого участка получаем следующую последовательность расчетов:

- время прохождения участка  $\Delta L$  при движении ленты конвейера:

$$\Delta t = \frac{\Delta L}{V_k}, \quad (2)$$

- ускорение частицы в направлении движения бегущего магнитного поля

$$a_1 = F_{m0} - k_{mp} \cdot g, \quad (3)$$

- составляющие скорости частицы в конце первого участка

$$V_{1X} = V_k, \quad V_{1Y} = V_{0Y} + a_1 \cdot \Delta t, \quad (4)$$

- перемещение частицы (по осям  $X$  и  $Y$ )

$$B_{X1} = \Delta L, \\ B_{Y1} = V_{0Y} \cdot \Delta t + \frac{a_1 \cdot (\Delta t)^2}{2}. \quad (5)$$

После определения скорости частицы в направлении поля  $V_{1Y}$  и положения частицы над индуктором  $B_{Y1}$  производится корректировка удельного электромагнитного усилия. В общем случае зависимость электромагнитного усилия от скорости движения частиц в направлении бегущего поля, подобная механической характеристике асинхронного двигателя, имеет сложный характер. Однако в случае одностороннего линейного индуктора с открытой магнитной системой, либо двухстороннего индуктора с повышенным немагнитным рабочим зазором характеристика становится мягкой. Примеры таких характеристик, рассчитанных для одного из экспериментальных сепараторов, показаны на рис. 4. Цифрами на графиках показаны зависимости, полученные для медных частиц (вторичных элементов) разных размеров ( $a = b$ ): 1 –  $2\tau$ , 2 –  $\tau$ , 3 –  $0,5\tau$ , 4 –  $0,4\tau$ , 5 –  $0,2\tau$ .

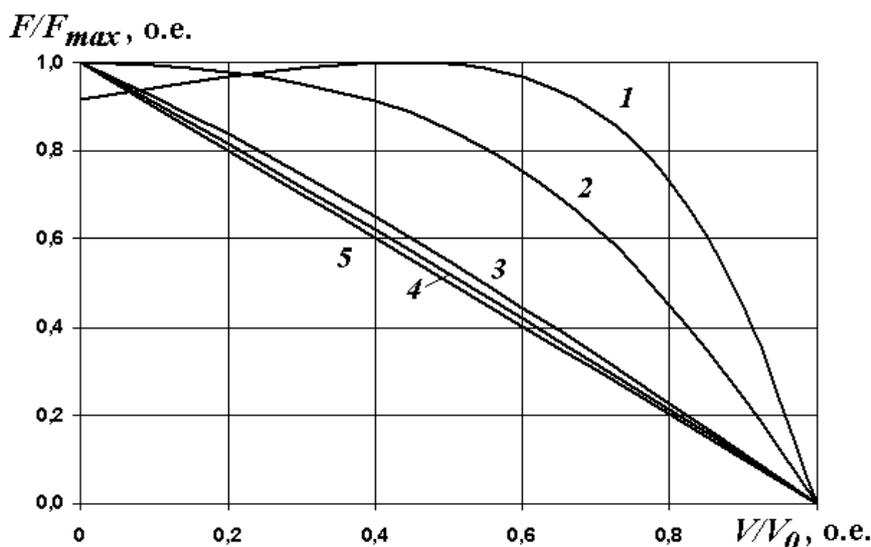


Рис. 4. Примеры зависимостей электромагнитного усилия в линейной индукционной машине сепаратора от скорости движения сепарируемых частиц

Нетрудно видеть, что при малых размерах ВЭ (для  $b < 0,5\tau$ ) зависимости усилия от скорости близки к линейным и характеристики могут быть приближенно аппроксимированы линейной зависимостью

$$F_{эм}(V, Y) = F_{эм0}(Y) \cdot \left(1 - \frac{V_y}{V_0}\right), \quad (6)$$

где  $F_{эм0}$  – пусковое усилие;  $V_0 = 2\tau f$  – скорость бегущего магнитного поля;  $\tau$  – полюсное деление индуктора;  $V_y$  – текущая скорость частицы в направлении движения поля.

Уточнив с учетом нового положения частицы над индуктором значение  $F_{эм0}$ , рассчитанное предварительно численными методами, и подставляя в (6) значение скорости частицы на выходе первого участка  $V_{1Y}$ , получаем скорректированное электромагнитное усилие.

Новое значение усилия вместе со значениями скорости и перемещения, определенными по (4) и (5), составляют начальные условия для второго участка зоны сепарации над индуктором. Последовательность расчета параметров движения частицы на втором участке аналогична показанной выше для первого участка:

– ускорение частицы на втором участке

$$a_2 = F_{m1} - k_{mp} \cdot g, \quad (7)$$

– составляющие скорости частицы в конце второго участка:

$$V_{2X} = V_k, \quad V_{2Y} = V_{1Y} + a_2 \cdot \Delta t, \quad (8)$$

– перемещение частицы от исходного положения

$$B_{X2} = 2 \cdot \Delta L, \\ B_{Y2} = B_{Y1} + V_{1Y} \cdot \Delta t + \frac{a_2 \cdot (\Delta t)^2}{2}. \quad (9)$$

С учетом новых значений скорости частицы в направлении поля  $V_{2Y}$  и положения частицы над индуктором  $B_{Y2}$  снова уточняется значение электромагнитного усилия. Далее расчеты повторяются для последующих участков индуктора до вы-

хода частицы за пределы ленты или индуктора. Если частица не вышла за пределы ленты, то она продолжает движение в направлении оси  $Y$  по инерции. Расчет параметров движения на участках зоны сепарации за индуктором аналогичен приведенному выше. Однако уравнение движения (1) упрощается, так как в этой зоне отсутствует электромагнитное усилие.

По разработанной методике выполнены расчеты траекторий движения проводящих частиц для электродинамического сепаратора, имеющего ленту конвейера шириной  $B_k = 1$  м, подающего сепарируемые отходы со скоростью  $V_k = 1$  м/с. За основу взят односторонний линейный индуктор с параметрами, соответствующими опытно-промышленной установке КМ-203М: полюсное деление  $\tau = 0,186$  м; количество полюсов  $2p = 6$ ; длина индуктора  $2p\tau = 1,116$  м; скорость бегущего магнитного поля (синхронная скорость машины)  $V_0 = 2 \tau f = 18,6$  м/с; ширина индуктора  $L_{и} = 0,35$  м, коэффициент трения с учетом сопротивления среды  $k_{тр} = 0,6$ . Электрические параметры сепаратора соответствуют тем, при которых рассчитывались удельные электромагнитные усилия ( $U_{л} = 380$  В, частота  $f = 50$  Гц, амплитуда линейной плотности тока  $J_{пм} = 110$  кА/м). Поэтому для расчета траекторий выбраны удельные электромагнитные усилия из диапазона, представленного на рис. 2 ( $F_m = 10, 20$  и  $30$  Н/кг).

На первом этапе расчетов рассматривался сепаратор с односторонним выходом извлекаемых частиц, схематично показанный на рис. 5. При этом в худшем случае извлекаемая частица должна преодолеть в направлении оси  $Y$  расстояние, равное ширине ленты  $B_k = 1$  м. Расчеты, результаты которых представлены на рис. 5, показывают, что частицы, для которых развиваются удельные электромагнитные усилия  $30$  Н/кг и выше, перемещаются за пределы ленты, не покидая активной зоны индуктора. Частицы металлов с удельным усилием от  $20$  до  $30$  Н/кг выходят за пределы индуктора по ленте, но удаляются с нее за счет сил инерции.

Частицы, для которых развиваются удельные электромагнитные усилия менее 20 Н/кг, не извлекаются и остаются в потоке отходов. Сопоставляя полученные результаты со значениями удельных электромагнитных усилий, показанными на рис. 2, можно говорить о том, что в данном сепараторе при расположении металла

на ленте ( $h = 10$  мм) надежно будут извлекаться алюминиевые частицы при крупности более 40-50 мм. В то же время частицы, находящиеся на поверхности слоя отходов, не будут извлекаться даже при крупности 60-70 мм. Это приводит к снижению качества сепарации, к потерям металла.

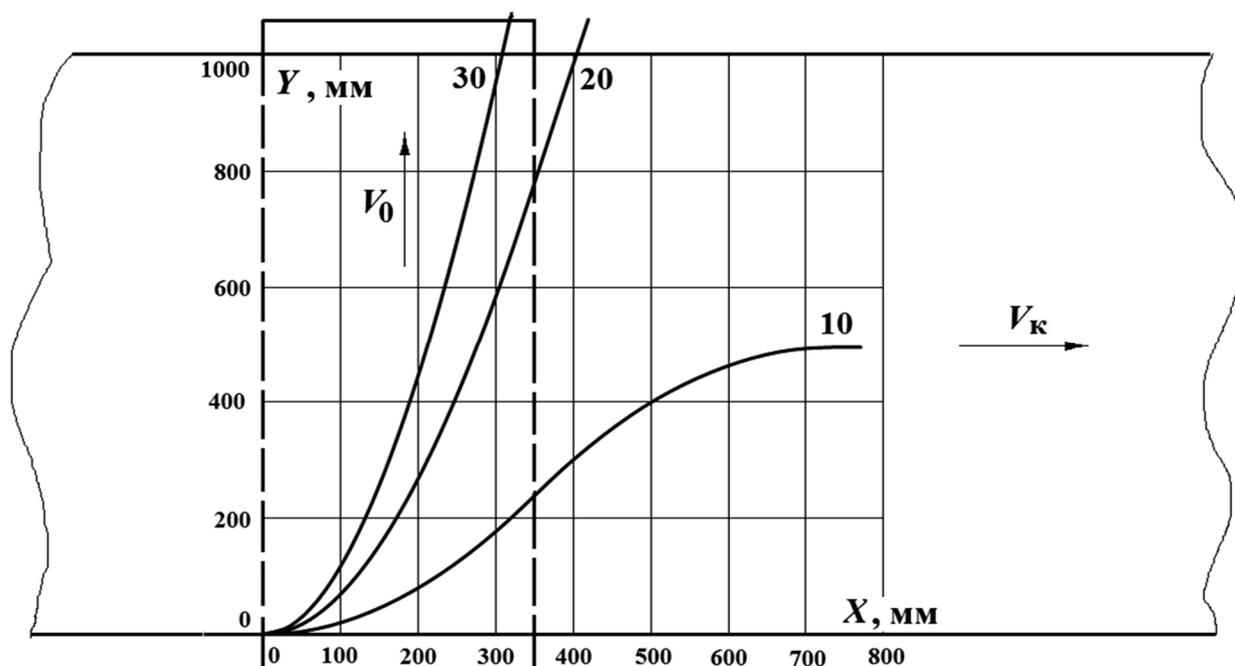


Рис. 5. Траектории движения проводящих частиц в сепараторе с односторонним выходом металла (значения удельных электромагнитных усилий  $F_m$  – 10, 20 и 30 Н/кг)

Для повышения эффективности сепарации можно использовать электродинамические сепараторы с двухсторонним выходом металла [14]. Такое решение было использовано, в частности, при создании сепаратора КМ-203М [9]. В таких сепараторах конструкция обмотки линейного индуктора обеспечивает создание бегущих магнитных полей, разбегающихся от центра индуктора, как показано на рис. 6. При этом для удаления с конвейера в худшем случае частице нужно пройти расстояние, равное половине ширины ленты  $B_k/2$ , а не  $B_k$ , как в предыдущем случае. Траектории движения проводящих частиц в сепараторе с двухсторонним выходом металла, рассчитанные для тех же условий, что и ранее, представлены на рис. 6.

Нетрудно видеть, что в данном случае в пределах активной ширины индуктора

с ленты удаляются частицы, для которых развиваются удельные электромагнитные усилия 20 Н/кг и выше. Частицы металлов с удельным усилием от 10 до 20 Н/кг выходят за пределы индуктора по ленте, но удаляются с нее за счет сил инерции. Частицы, для которых развиваются удельные электромагнитные усилия менее 10 Н/кг, не извлекаются и остаются в потоке отходов. Полученные результаты позволяют говорить о надежном извлечении из потока отходов частиц алюминиевых сплавов крупностью более 40 мм. Частицы, лежащие на поверхности слоя отходов, извлекаются при крупности более 50-60 мм. Отметим, что данные выводы совпадают с оценками, полученными при испытаниях и эксплуатации сепаратора КМ-203М [9].

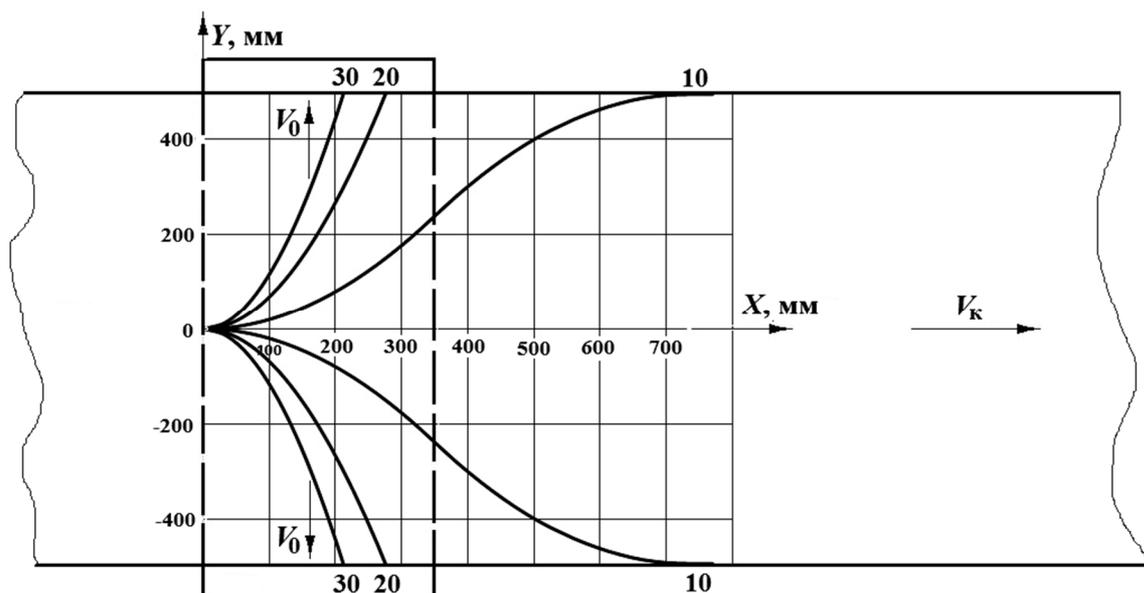


Рис. 6. Траектории движения проводящих частиц в сепараторе КМ-203М с двусторонним выходом металла

Таким образом, разработана методика расчета траекторий движения проводящих частиц в электродинамическом сепараторе на базе линейного индуктора, основанная на решении уравнений движения и учитывающая совместное действие на частицу электромагнитных и механических сил. Методика позволяет определять траектории движения частиц разной

крупности с разными физическими свойствами и оценивать работоспособность сепаратора уже на стадии проектирования. Результаты исследований подтвердили преимущества электродинамического сепаратора на основе линейного индуктора, создающего разбегающиеся магнитные поля, с двусторонним выходом металла.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Комплексная стратегия обращения с твердыми коммунальными отходами в Российской Федерации (утверждена Приказом Минприроды России от 14.08.2013 № 298). [Электронный ресурс]. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70345114..>
2. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 г. (утв. Распоряжением Правительства РФ от 25.01.2018 № 84-р). [Электронный ресурс]. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_289114/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_289114/).
3. Шубов Л.Я. Технология твердых бытовых отходов / Л.Я. Шубов, М.Е. Ставровский, А.В. Олейник. М.: Альфа-М, Инфра-М, 2011. 400 с.
4. Электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем: основы теории и расчета / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, Н.Е. Маркин, С.Л. Назаров. Екатеринбург: УрФУ, 2012. 104 с.
5. Wilson R.J. Application of mineral processing techniques for the recovery of metal from post-consumer wastes / R.J. Wilson, T.J. Veasey, D.M. Squires // Minerals Engineering. 1994. № 7. P. 975-984.
6. Lungu M. Eddy-current separation of small nonferrous particles by a single-disk separator with permanent magnets / M. Lungu, P. Rem // IEEE Transactions on Magnetics. 2003. № 39 (4). P. 2062-2067. Doi:10.1109/tmag.2003.812724.
7. Settimo F. Eddy current separation of fine non-ferrous particles from bulk streams /

F. Settimo, P. Belivacqua, P. Rem // Physical Separation in Science and Engineering. 2004. Vol. 13. № 1. P. 15-23. Doi: 10.1080/00207390410001710726.

8. **Smith Y.R.** Eddy current separation for recovery of non-ferrous metallic particles: A comprehensive review / Y.R. Smith, J.R. Nagel, R.K. Rajamani // Minerals Engineering. 2019. № 133. P. 149-159. Doi: 10.1016/j.mineng.2018.12.025.

9. Устройства для электродинамической сепарации лома и отходов цветных металлов / А.А. Патрик, Н.Н. Мурахин, А.Ю. Коняев и др. // Промышленная энергетика. 2001. № 6. С. 16-19.

10. **Коняев А.Ю.** Сепараторы для извлечения цветных металлов из твердых коммунальных отходов / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, И.А. Коняев // Твердые бытовые отходы. 2017. № 3. С. 36-39.

11. Особенности электродинамической сепарации мелкой фракции твердых бытовых отходов / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, Д.Н. Багин, И.А. Коняев // Экология и

промышленность России. 2017. Т. 21. № 6. С. 4-9.

12. **Колычев Н.А.** Оптимизация обращения с твердыми бытовыми и близкими к ним по составу промышленными отходами в крупных и средних населенных пунктах России / Н.А. Колычев // Биосфера: междисциплинарный научный и прикладной журнал. 2013. Т. 5. № 4. С. 393-418.

13. **Коняев А.Ю.** Исследования характеристик электродинамических сепараторов на основе двумерной модели / А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров // Электротехника. 1998. № 5. С. 52-57.

14. Применение линейных индукторов со встречно бегущими магнитными полями в электродинамических сепараторах / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, Д.Н. Багин, М.Е. Зязев // Вестник Пермского национального исследовательского университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 32. С. 22-37.

---

**Зязев Михаил Евгеньевич** – аспирант кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета, Екатеринбург

**Коняев Андрей Юрьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета, Екатеринбург

**Гиззатуллин Эльмир Вилевич** – магистрант кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета, Екатеринбург

**Mikhail E Zyazev** – Postgraduate, Department of Electrical Engineering, the Urals Federal University, Ekaterinburg

**Andrey Yu Konyaev** – Dr.Sc. (Tech.), Professor, Department of Electrical Engineering, the Urals Federal University, Ekaterinburg

**Elmir V. Gizatullin** – Master student, Department of Electrical Engineering, the Urals Federal University, Ekaterinburg

*Статья поступила в редакцию 14.07.21, принята к опубликованию 12.08.21*

УДК 621.31.042

## УТОЧНЕННЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ АНАЛИЗ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ СЕПАРАТОРОВ НЕМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю.Б. Казаков, Ю.И. Страдомский, В.А. Филиппов, С.А. Нестеров

### UPDATED ELECTROMAGNETIC ANALYSIS OF SEPARATORS WITH MAGNETIC FLUIDS FOR NON-MAGNETIC MATERIALS

Yu.B. Kazakov, Yu.I. Stradomsky, V.A. Filippov, S.A. Nesterov

*Магнитожидкостная сепарация является перспективным способом разделения смесей немагнитных материалов на фракции по плотности с возможностью электромагнитной регулировки границ сепарации. Точность разделения материалов в электромагнитных магнитожидкостных сепараторах определяется применяемой конструкцией и режимом работы. Электромагнитные процессы в таких сепараторах недостаточно исследованы, особенно при разделении частиц малых размеров, многокомпонентных и многофракционных смесей частиц разнородных материалов. Не в полной мере рассмотрены вопросы влияния формы немагнитных частиц, степени заполнения рабочего зазора сепаратора частицами. В связи с этим является актуальным уточненный электромагнитный анализ электромагнитных магнитожидкостных сепараторов немагнитных материалов с учетом распределения магнитного поля и влияния гидродинамических свойств магнитной жидкости на движение частиц в зоне разделения. Для достижения цели используются численные методы анализа электромагнитных процессов в магнитожидкостных сепараторах. Полученные результаты позволяют разрабатывать усовершенствованные конструкции электромагнитных сепараторов с повышенной точностью сепарации.*

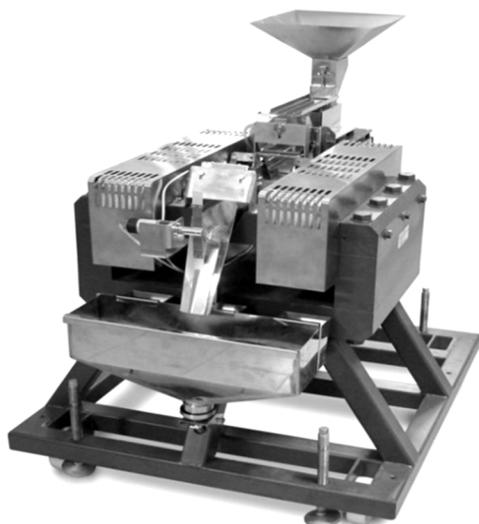
**Ключевые слова:** сепарация немагнитных материалов, магнитная жидкость, электромагнитный магнитожидкостный сепаратор, уточненный электромагнитный анализ

*Magnetic fluids separation is a promising method for separating mixtures of non-magnetic materials into density fractions with a possibility for electromagnetic separation control. The accuracy of material separation in electromagnetic magnetic fluid separators is determined by their design and operating mode. Electromagnetic processes in such separators have not been sufficiently studied, especially when separating small particles, multicomponent and multifractional mixtures of particles of dissimilar materials. The issues relating the influence of the shape of non-magnetic particles, the degree of filling the working gap of the separator with particles are not fully considered. In this regard, an updated electromagnetic analysis of electromagnetic magnetic fluid separators of non-magnetic materials, taking into account the distribution of the magnetic field and the influence of hydrodynamic properties of the magnetic fluid on the movement of particles in the separation zone is urgent. To achieve this goal, numerical methods for analyzing electromagnetic processes in magnetic fluids separators are used. The results obtained make it possible to develop improved designs of electromagnetic separators with enhanced separation accuracy.*

**Keywords:** separation of non-magnetic materials, magnetic fluid, electromagnetic magnetic fluid separator, updated electromagnetic analysis

**Введение**

Развитие производства и потребления товаров приводит к увеличению бытовых и промышленных отходов. Многие современные изделия разрабатываются на срок функционирования, совпадающий со сроком гарантии. Производителям часто выгоднее изготовить новое изделие, чем заниматься переработкой устаревших изделий. В то же время эффективная сортировка отходов и извлечение фракций материалов, пригодных для вторичного использования, снижает загрязнение окружающей среды, сохраняет природные ресурсы [1-3]. Совершенствование технологий утилизации и промышленной переработки отходов - важнейшая эколого-экономическая задача. В РФ принята стратегия по переработке отходов промышленного производства на период до 2030 года [4]. В стратегии развитие научно-исследовательских и опытно-конструкторских инновационных

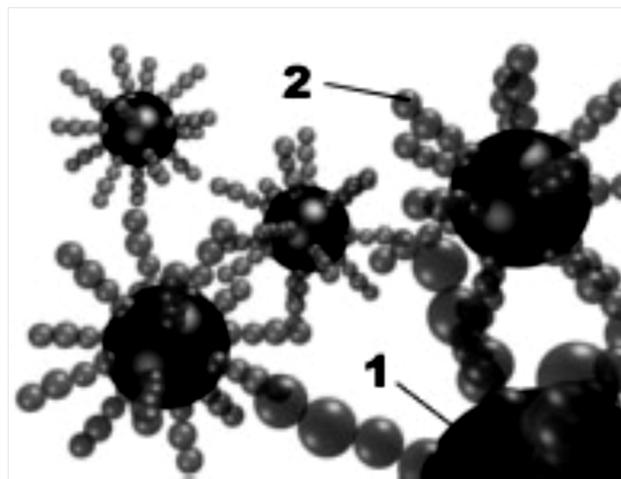


**Рис. 1.** Электромагнитный магнитожидкостный сепаратор

МЖ в ЭМЖС удерживается между возбужденными полюсами электромагнита в зазоре. МЖ стремится втянуться в зону максимальной напряженности магнитного поля  $H_{max}$ , возникает действующая на нее магнитная сила и т. н. «псевдоутяжеление» МЖ. При увеличении магнитной проницаемости МЖ и градиента напряженности  $\nabla H$

технологий утилизации отходов объявлены приоритетным направлением.

Перспективной технологией сортировки твердых немагнитных материалов является их разделение в электромагнитных магнитожидкостных сепараторах (ЭМЖС) [5] (рис. 1). ЭМЖС содержит магнитопровод с обмоткой возбуждения и магнитную жидкость (МЖ) в зазоре электромагнита. МЖ – устойчивый жидкий коллоид в составе жидкости-носителя (вода, масла, фторорганика) и наноразмерных (10-40 нм) ферромагнитных частиц, покрытых поверхностно-активным веществом [2] (рис. 2). Чем выше концентрация магнитных частиц в МЖ, тем сильнее она проявляет магнитные свойства, выше ее магнитная проницаемость  $\mu_{ж}$ , нелинейнее магнитная характеристика. Применяют МЖ с плотностью  $\rho_{ж} = (1,0 \div 1,5) \text{ г/см}^3$ , относительной магнитной проницаемостью  $1.05 \div 2$ , намагниченностью насыщения  $M_s = (10 \div 40) \text{ кА/м}$ .



**Рис. 2.** Магнитная жидкость содержит ферромагнитные частицы (1), покрытые поверхностно-активным веществом (2), в жидкости-носителе

усиливается степень «псевдоутяжеления» МЖ. При погружении в МЖ немагнитной частицы на него будет действовать выталкивающая из МЖ по аналогии с силой Архимеда  $F_a$  сила магнитной сепарации  $F_c$ . Изменением тока возбуждающей обмотки  $I_{в}$  возможно бесконтактным электромагнитным путем изменять в зазоре  $H$ ,  $\nabla H$ , степень

«псевдоутяжеления» МЖ,  $F_c$  и, соответственно, порог плотности материалов при регулировке сепарации немагнитных частиц. Управляемые ЭМЖС способны сортировать смеси частиц на фракции при плотностях  $\rho_c$  от 1,5 до 20 г/см<sup>3</sup> в ЭМЖС. Отличие электропроводящих свойств частиц не влияет на точность их сепарации, нет обязательности к одинаковой крупности частиц.

Опыт исследований и эксплуатации сепараторов показывает, что их целесообразно применять при обогащении природных ископаемых и минерального сырья; для проведения фракционного экспресс-анализа материалов; при выделения свободного золота из шлиховых россыпей и доводки алмазосодержащих руд; при отбраковке изделий по плотности; для сепарации дробленого автомобильного и кабельного лома, лома бытовой техники, электротехнического и электронного оборудования при выделении цветных металлов [6-13]. Это имеет большой экономический эффект, так как стоимость только цветных металлов, содержащихся в 40 млн т ежегодного электронного десятков лома в мире, достигает миллиарда долларов.

Перспективные свойства ЭМЖС вызывают повышенный интерес к ним. Но используемые образцы ЭМЖС не отвечают современным требованиям по функциональности, производительности и точности сепарации. Электромагнитные процессы в ЭМЖС недостаточно исследованы при разделении частиц малых размеров, многокомпонентных и многофракционных смесей частиц разнородных материалов. Не в полной мере рассмотрены вопросы влияния формы немагнитных частиц, степени заполнения рабочего зазора ЭМЖС частицами. В целом недостаточное исследование ЭМЖС технологического назначения сдерживает их практическое применение. В связи с этим уточненный электромагнитный анализ электромагнитных магнитожидкостных сепараторов немагнитных материалов является актуальным.

### Моделирование

По схеме работы ЭМЖС [14] (рис. 3) с лотка подается немагнитная частица объемом  $V_c$  с начальной скоростью  $\bar{v}_0$ . Частица попадает в МЖ с вязкостью  $\eta$  (для сепарации обычно используют маловязкие МЖ). В продольном направлении полюсные наконечники электромагнита ЭМЖС длинной активной части полюсов  $L$  наклонены под углом  $\alpha$  к горизонту, так чтобы легкие частицы скатывались по поверхности МЖ из зоны сепарации.

В МЖ на частицу действуют:

– сила тяжести

$$\bar{F}_T = \rho_c \bar{g} V_c, \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;

– сила Архимеда

$$\bar{F}_A = \rho_{жс} \bar{g} V_c; \quad (2)$$

– сила вязкостного сопротивления движению частицы диаметром  $d$  в МЖ

$$\bar{F}_B = -3\pi\eta d_c \bar{v}; \quad (3)$$

– сила магнитной сепарации

$$\bar{F}_C = -\mu_0 M_s V_c \nabla \bar{H} = -M_s V_c \nabla \bar{B}. \quad (4)$$

Вертикальная удельная сила магнитной сепарации

$$\begin{aligned} \frac{\bar{F}_C}{V_c} &= f_m = g(\rho_c - \rho_{жс}) = \\ &= \mu_0 M_s \frac{\partial H}{\partial y} = M_s \frac{\partial B}{\partial y}. \end{aligned} \quad (5)$$

Немагнитная частица всплывает на поверхность МЖ при выполнении в статике условия

$$\begin{aligned} \bar{F}_C + \bar{F}_A &> \bar{F}_T \\ \text{или } \mu_0 \frac{\partial H}{\partial y} &= \frac{\partial B}{\partial y} > \frac{\rho_c - \rho_{жс}}{M_s}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\partial B/\partial y$  – составляющая градиента магнитной индукции по вертикальной оси.

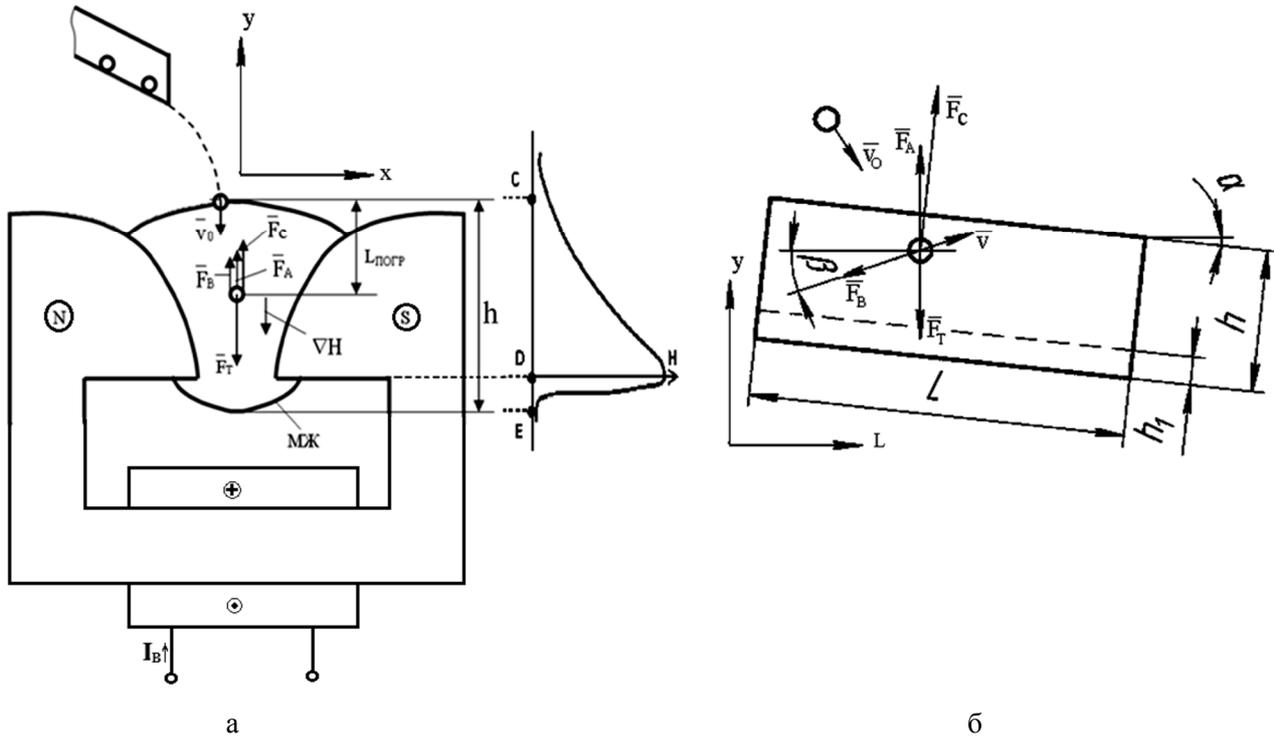


Рис. 3. Схема работы ЭМЖС в поперечном (а) и продольном (б) сечениях

Немагнитная частица выпадает из МЖ при невыполнении условия (6).

Таким образом, при заданных  $M_S$ ,  $\rho_c$  и  $\rho_{ж}$  требуемое для сепарации значение  $\partial B/\partial y$  определяется величиной  $g(\rho_c - \rho_{ж})$ .

На линии D в магнитной жидкости высотой столба  $h$  (рис. 3 а)  $\partial B/\partial y$  меняет знак, поэтому будет меняться направление  $\vec{F}_C$ . На участке CD  $\vec{F}_C$  способствует всплытию немагнитной частицы. На участке DE (высота расположения минимального зазора относительно нижней поверхности МЖ  $h_1$ )  $\vec{F}_C$  способствует погружению частицы и выпадению ее из МЖ. Направление  $\vec{F}_C$  определяется вектором  $\nabla H$ , поэтому  $\vec{F}_C$  не всегда направлена по оси  $y$  (рис. 3 б).

Магнитная жидкость удерживается в зазоре магнитным полем электромагнита. Высота столба  $h$ , удерживаемой МЖ (рис. 3 а), определяется из равенства удельных энергий МЖ в гравитационном и магнитном полях

$$\rho_{ж} g h = \mu_0 \int_0^h M_S dH. \quad (7)$$

Форма поверхности МЖ определяется распределением магнитного поля и поверхностным натяжением жидкости. МЖ располагается по линии равной напряженности магнитного поля. Поэтому рассчитывается магнитное поле, находятся линии равной напряженности в зонах С и Е и по заданному объему МЖ определяется ее положение и форма.

Для точного разделения частиц по плотности должно оставаться  $\vec{F}_C = \text{const}$  по высоте столба МЖ на участке CD, т.е. должно сохраняться условие  $\nabla B = \text{const}$ . Это обеспечивается соответствующим выбором минимального зазора и формы поверхностей полюсных наконечников (рис. 4). Минимальная ширина зазора  $2x_{no}$  должна превышать максимальный диаметр «тяжелых» немагнитных частиц  $d_{ч, \max}$ , которые будут проходить сквозь зону сепарации. Форма поверхностей наконечника рассчитывается для заданной интенсивности поля. Если по условиям сепарации требуется обеспечение максимальной индукции (в минимальном зазоре) в диапазоне  $B_{\max x_{no}} = (0,7-1,0)$  Тл и минимальной индукции (в максимальном зазоре) –  $B_{\min} = 0,4$  Тл, то в таких полях МЖ

находится в магнитном насыщении и ее намагниченность составляет  $M = M_s$ . В предположении горизонтальных линий равной напряженности между точками на поверхности полюсных наконечников с одинаковой вертикальной координатой (рис. 4) зазор  $x_n$  на высоте  $y_n$  определяется соотношением

$$x_n = x_{no} \frac{1}{1 - \frac{\partial H}{\partial y} \frac{(y_n - y_{no})}{H_{no}}} = x_{no} \frac{1}{1 - \frac{g(\rho_u - \rho_{жс})}{\mu_0 M_s} \frac{(y_n - y_{no})}{H_{no}}} \quad (8)$$

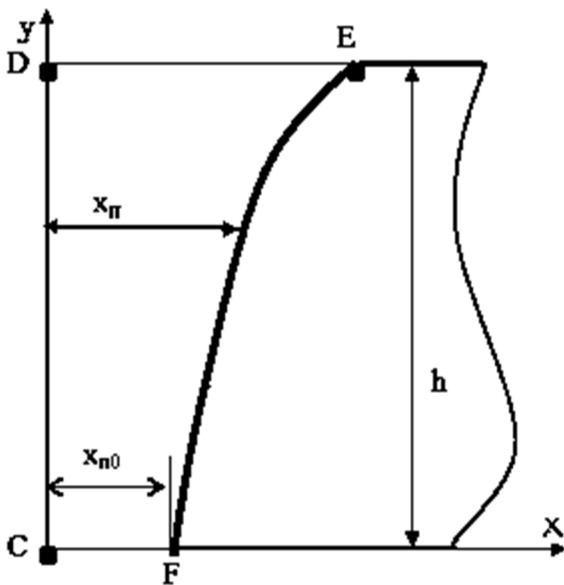


Рис. 4. Профиль полюсов ЭМЖД, обеспечивающих постоянство  $F_C$

Обозначим

$$A = \frac{g(\rho_u - \rho_{жс})}{M_s B_{max}}, \quad (9)$$

тогда

$$x_n = x_{no} \frac{1}{1 - A(y_n - y_{no})}. \quad (10)$$

Такое формирование наконечников полюсов сепаратора, заданные  $A$  и  $x_{n0}$  позволяют определить высоту зоны сепарации в зазоре  $h_C = h - h_1$  (рис. 3) – зону, где сила

сепарации немагнитной частицы из МЖ  $F_C$  постоянна.

Процесс движения немагнитной частицы в МЖ, условие всплытия или погружения частицы в МЖ определяются из уравнения векторной суммы сил

$$\frac{dv}{dt} \rho_u V_u + 3\pi \eta v d_u = g(\rho_u - \rho_{жс}) V_u - \mu_0 M V_u \nabla H. \quad (11)$$

Из (11) получены соотношения для времени  $t_{noz}$  и уровня  $h_{noz}$  погружения частицы. По значениям  $h_{noz}$ , зависящей от  $A$ , определяется форма профиля наконечников полюсов ЭМЖС, минимальный зазор и др.

Магнитная проницаемость МЖ  $\mu_{жс}$  больше магнитной проницаемости немагнитной частицы. В связи с этим, помещение немагнитной частицы в МЖ приводит к перераспределению магнитного поля полюсов электромагнита. Поэтому величина объема  $V_u$  и форма немагнитной частицы будут влиять на величину  $\bar{F}_C$ . Очевидно, что точность расчета сепарации определяется точностью расчета силы магнитной сепарации  $\bar{F}_C$  и, следовательно, точностью расчета магнитного поля и  $\nabla \bar{H}$ . Для повышения точности расчета сепарации проводилось конечно-элементное моделирование магнитных полей в ЭМЖС, затем избыточных давлений и сил на немагнитные частицы. Численный расчет двухмерного магнитного поля выполнялся в системах ELCUT и Ansys Maxwell. Использовались неоднородные конечно-элементные сетки с размерами элементов много меньше размеров немагнитных частиц, но крупнее нанодисперсных магнитных частиц МЖ. Распределение избыточных давлений на частицы определялось по результатам анализа магнитных полей, программно экспортированных в систему MS Excel,

### Анализ результатов

Наибольшее требуемое значение  $\partial B / \partial y$  можно оценить по (6) из условия всплытия из МЖ на поверхность наиболее плотных частиц, например, золота с  $\rho_u \approx 20 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

При использовании МЖ с  $M_s = 20$  кА/м и  $\rho_{жс} \approx 10^3$  кг/м<sup>3</sup>  $\partial B/\partial u$  должно составить 9,5 Тл/м. Анализ показывает, что это требование достижимо в рассматриваемых конструкциях. Также определено, что для удовлетворительной сепарации целесообразно выбирать такие  $M_s$  и  $H$ , чтобы рассчитанная по (7)  $h$  составляла (0,05÷0,1) м.

Диапазоны изменения величин при сепарации могут составлять: различие плотностей частиц металлов  $\rho_c$  (от алюминия до свинца) с плотностью МЖ –

$(\rho_c - \rho_{жс}) = 4000 \div 12000$  кг/м<sup>3</sup>; используются МЖ с  $M_s = 10 \div 40$  кА/м; максимальная индукция в минимальном зазоре  $B_{\max} = 0,4 \div 1$  Тл. В этом случае рассчитанные значения  $A$  по (9) составляют  $1 \div 30$  м<sup>-1</sup>. Рассчитанные по (10) соотношения координат поверхностей полюсных наконечников для разных значений  $A$  представлены на рис. 5. Формирование таких поверхностей полюсов обеспечивает  $F_{\text{ВЫГ}} \approx \text{const}$  с погрешностью не более 5 %.

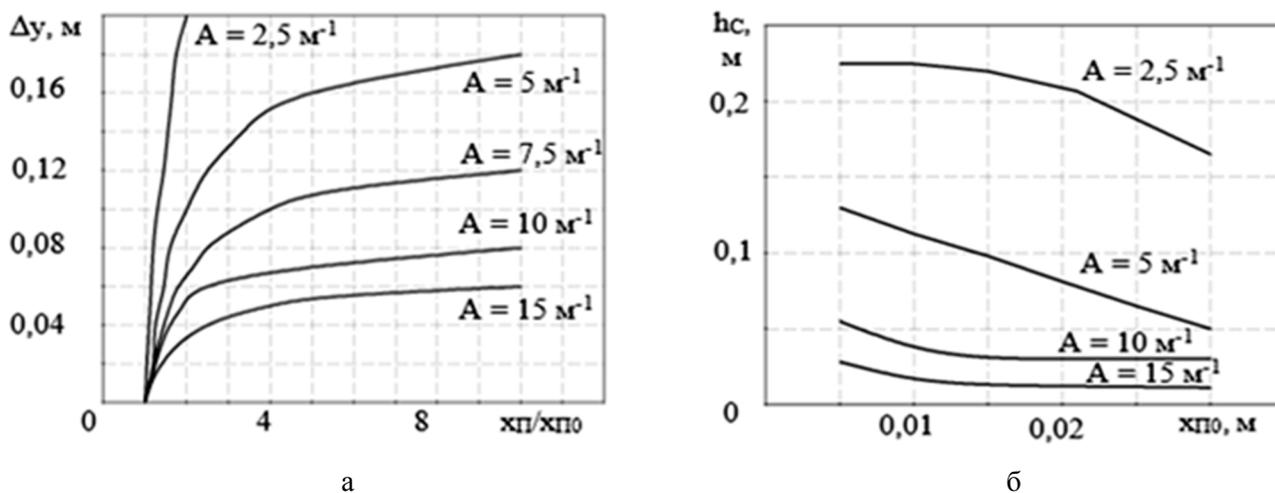


Рис. 5. Необходимые соотношения координат поверхностей полюсных наконечников (а) и изменения высоты зоны сепарации ЭМЖС при разных значениях  $A$

На рис. 6 представлены зависимости глубины погружения немагнитной частицы в МЖ от параметра  $A$ . Рабочая часть столба магнитной жидкости  $h_p = h_c$  определяется и точкой пересечения графиков магнитной и гравитационной энергий. Зависимости  $h_p$  от  $A$  и минимального зазора  $x_{n0}$  представлены на рис. 7.

По результатам расчетов в программе [15] для заданной  $v_0$  частицы установлены диапазоны возрастания глубины ее погружения в МЖ с повышением плотности частицы. Частица с большей кинетической энергией при входе в МЖ может проскочить зону сепарации (участок CD). Это может приводить к снижению точности сепарации (в тяжелую фракцию будут попадать частицы легкой фракции). При уменьшении градиента напря-

женности в 3 раза для частиц легкой фракции время движения возрастает в 2-6 раз за счет снижения магнитной силы сепарации и возрастания глубины погружения. Снижение плотности частиц в 4 раза увеличивает время их движения частиц на 20 %. Снижение диаметра частиц уменьшает глубину погружения, силу вязкого сопротивления и время движения. При изменении формы частицы изменяется траектория движения частиц. Результаты расчета магнитного поля в зазоре ЭМЖС с присутствием в МЖ немагнитной частицы представлены на рис. 8. Очевидно, что наличие немагнитной частицы вызывает перераспределение магнитного поля, увеличение размеров частицы снижает максимальную напряженность магнитного поля.

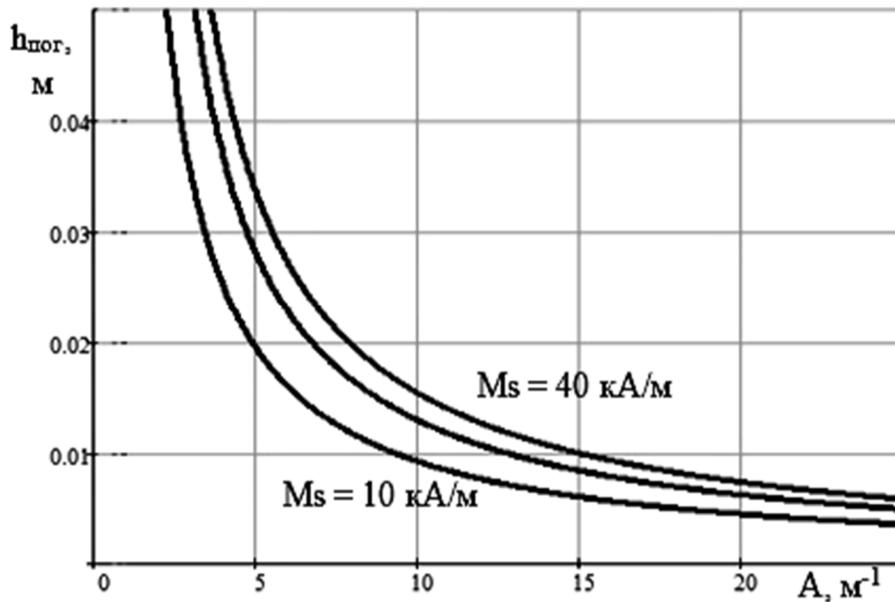


Рис. 6. Глубина погружения немагнитной частицы в зависимости от значений  $A$  и  $M_s$

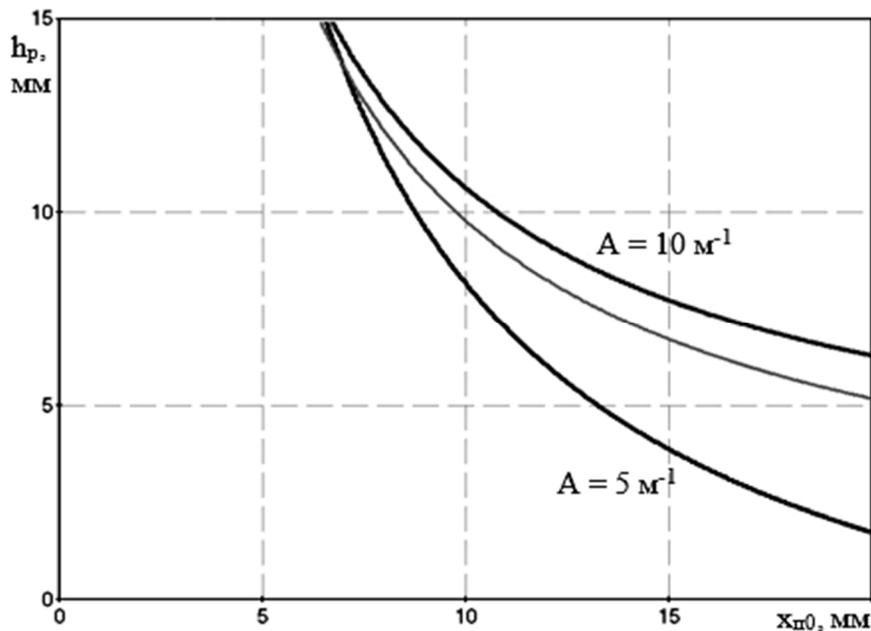


Рис. 7. Зависимость высоты рабочей зоны сепарации от минимального зазора при разных  $A$

Анализ результатов показал, что  $H$  меняется линейно с изменением высоты зазора и градиент напряженности постоянен. Так как  $H > 230 \text{ кА/м}$ , то МЖ находится в состоянии насыщения и ее намагниченность  $M = M_s = \text{const}$ . Следовательно, распределение магнитного поля в зазоре в ЭМЖС при таком формировании поверхностей полюсных наконечников удовлетворяет условиям сепарации.

Распределение изобар избыточного

давления  $\Delta p = p - p_0$  в МЖ в присутствии немагнитной частицы  $6 \times 9 \text{ мм}^2$  показано на рис. 9. На рис. 10 приведено распределение  $\Delta p$  по оси  $x$  на различных координатах  $y$  МЖ по нижней и верхней границам немагнитной квадратной частицы. Очевидно различие давлений по границам частицы и возникновение дополнительной выталкивающей силы  $F_c$  как разницы давлений. На рис. 11 и в таблице приведены зависимости изменения удельной силы  $f_m$  от  $V_c$ .

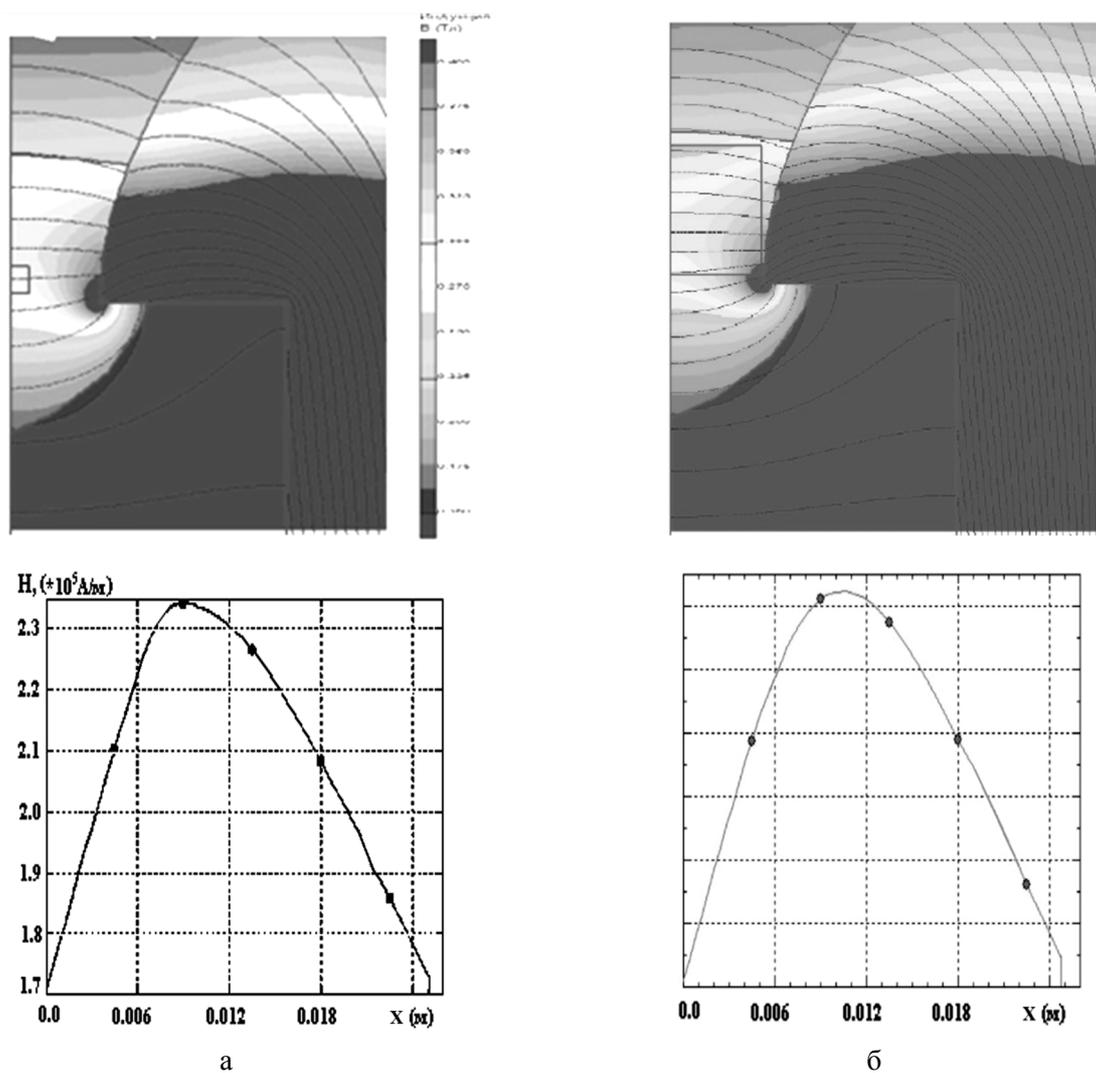


Рис. 8. Распределение линии магнитного потока и изменение  $H$  по  $x$  в ЭМЖС с квадратной немагнитной частицей малых (а) и увеличенных размеров (б)

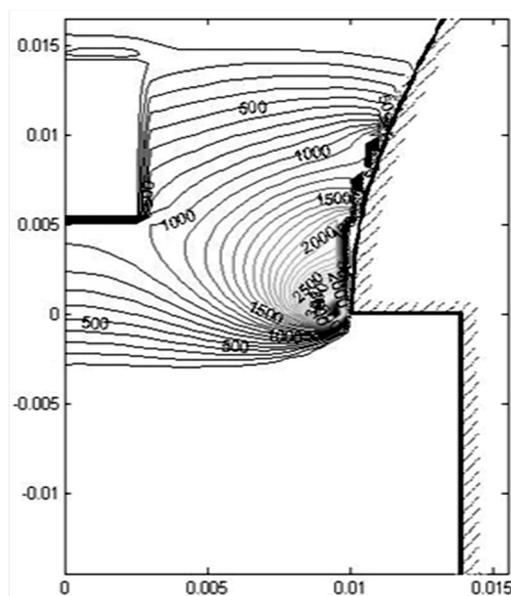


Рис. 9. Распределение  $\Delta p$  в МЖ с немагнитной частицей  $6 \times 9 \text{ мкм}^2$

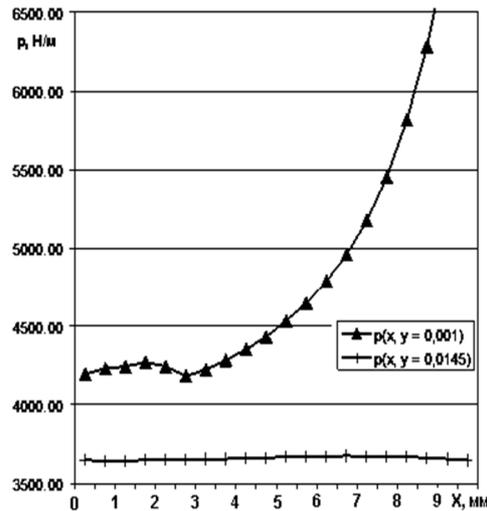


Рис. 10. Изменение давлений по  $x$  для нижней и верхней границ немагнитной частицы

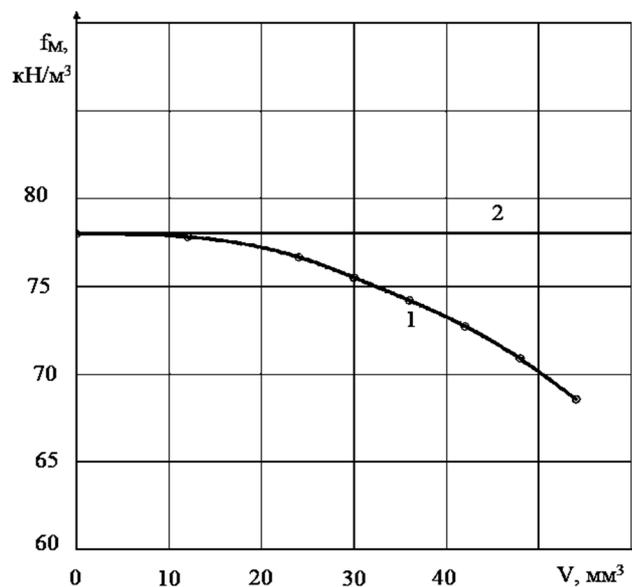


Рис. 11. Изменение  $f_m$  от  $V_v$ : 1 – с учетом перераспределения  $B$ ; 2 – без учета перераспределения  $B$

Зависимость  $f_m$  от объема немагнитной частицы

$V_v, \text{мм}^3$	24	30	36	42	48	54
$V_v/V_{\text{мжс}}, \%$	6,2	8	9,3	11	12,4	14
$f_m, \text{кН/м}^3$ (с учетом перераспределения $B$ )	76,67	75,19	74,06	72,74	70,88	68,59
$\Delta f_m, \%$	0	-1,9	-3,4	-5,1	-7,5	-10,5

Возрастание заполнения зоны сепарации частицами немагнитных материалов уменьшает градиент напряженности магнитного поля и силы сепарации. Для сферической частицы с  $d_v/2 = 0,9 x_{no}$  уменьшение  $F_C$  достигает 15 %, по сравнению с частицей с  $d_v/2 = 0,1 x_{no}$ . Если при том же объеме форму

сферической частицы изменить на дисковую, то снижение  $F_C$  достигает (5-7) %. Если При зона сепарации на 49 % заполнена частицами немагнитных материалов, то сила сепарации уменьшается до 34 %.

Проверка расчетных результатов выполнена путем сравнения опытов на физи-

ческой модели ЭМЖС [16]. Применялась рассчитанная по (10) форма поверхностей полюсных наконечников. Использовалась МЖ с  $M_s = 17$  кА/м. Высота столба МЖ составляла  $h = 40$  мм, минимальный зазор между полюсными наконечниками –  $\delta_{мин} = 2 x_{по} = 19,5$  мм. Изменением тока электромагнита  $I_6$  изменялась  $F_C$ . Экспериментально выявлено изменение  $I_{впогр}$  (при полном погружении в МЖ свинцовой частицы) и  $I_{пад}$  (выпадении из МЖ свинцовой частицы) при изменении  $d_q/\delta_{мин}$  (рис. 12). При возрастании отношения  $d_q/\delta_{мин}$  в области частицы снижаются градиент магнитного поля и сила сепарации. Что бы обеспечить прежнее значение силы сепарации требуется повышать  $I_6$ .

На основе анализа результатов расчетов установлено, что на немагнитную частицу с  $d_q = 18$  мм ( $d_q/\delta_{мин} = 0,92$ ) действует сила сепарации, составляющая 0,87 от магнитной силы, действующую на МЖ такого объема. По экспериментальной зависимости  $I_{пад, опыт}$  (рис. 12) определено, что отношение сил  $\sim 0,83$ . Различие между экспериментальными и расчетными данными не превышает 5%. Это характеризует правильность методики исследований.

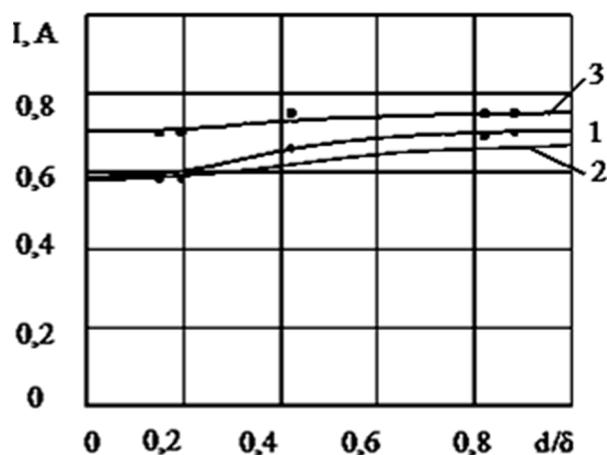


Рис. 12. Изменения токов при изменении  $d/\delta$ : 1 –  $I_{пад, опыт}$ ; 2 –  $I_{пад, расчет}$ ; 3 –  $I_{впогр, опыт}$

Влияние коэффициента заполнения зоны сепарации немагнитными свинцовыми частицами  $k = V_q/V_{МЖ}$  на ток всплытия  $I_{вспл}$  приведено на рис. 13. Увеличение  $k$  уменьшает интенсивность магнитного поля, силу

сепарации. Это вызывает необходимость повышения  $I_B$  для всплытия этих частиц.

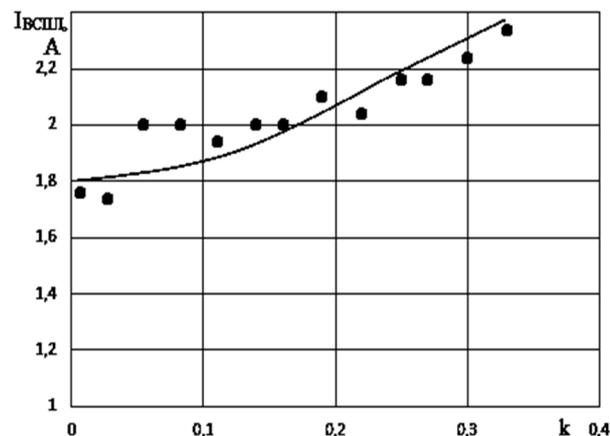


Рис. 13. Влияние коэффициента заполнения зазора ЭМЖС свинцовыми частицами на  $I_{вспл}$

На основе результатов исследований запатентована конструкция усовершенствованного электромагнитного магнитожидкостного сепаратора с улучшенными свойствами по точности сепарации и функциональности [17].

### Заключение

Разработанная методика уточненного электромагнитного анализа элементарных магнитожидкостных сепараторов немагнитных частиц на основе конечно-элементного расчета распределений магнитных полей с учетом их перераспределения при наличии в МЖ немагнитных частиц, нелинейных характеристик намагничивания магнитопровода ЭМЖС и МЖ, немагнитных частиц разных размеров и форм и, степени заполнения немагнитными частицами магнитожидкостной зоны сепарации позволяет повысить точность расчетов давлений и сил сепарации, действующих на частицы немагнитных материалов в МЖ.

Выявлено влияние изменения коэффициента заполнения зазора немагнитными частицами, отклонения формы частиц от сферической, размеров немагнитных частиц на изменение силы сепарации. Изменением тока возбуждения возможно бесконтактным электромагнитным путем изменять порог плотности материалов при регулировке сепарации немагнитных частиц.

Установлено, что для повышения точности сепарации целесообразно увеличение высоты зоны сепарации за счет применения МЖ с большей  $M_s$  и/или увеличения интенсивности магнитного поля. Возрастание  $M_s$  возможно путем использования МЖ с большей концентрацией магнитной фазы МЖ, но это вызывает возрастание вязкости МЖ, что замедляет процесс сепарации. Увеличение интенсивности магнитного поля возможно возрастанием тока электромагнита.

Предложен расчет формы поверхностей наконечников полюсов электромагнитного

магнит жидкостного сепаратора, который позволяет сформировать требуемое распределение магнитного поля. Это позволяет повысить точность сепарации частиц немагнитных материалов с погрешностью не более 7 %. Экспериментальные исследования подтверждают результаты теоретических исследований с погрешностью не более 8 %.

На основе результатов исследований запатентована конструкция усовершенствованного ЭМЖС повышенной точности сепарации и функциональности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Глобальный мониторинг электронных отходов / К.П. Балде, В. Форти, В. Грей, Р. Кюр, П. Стегманн; Университет Организации объединенных наций (УООН), Международный союз электросвязи (МСЭ) и Международная ассоциация по твердым отходам (МАТО), Бонн, Женева, Вена, 2017. 116 с. [https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/GEM\\_2017-R.pdf](https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/GEM_2017-R.pdf) (дата обращения: 06.05.2021).
2. An international comparative study of end-of-life vehicle (ELV) recycling systems: REVIEW: End-of-Life Vehicle (ELV) Recycling / Shin-ichi Sakai and etc. // *J Mater Cycles Waste Manag.* 2014. 16:1-20. DOI 10.1007/s10163-013-0173-2.
3. **Dalmijn W.L.** The Development of Vehicle Recycling in Europe: Sorting, Shredding, and Separation / W.L. Dalmijn, T.P.R. De Jong // *JOM.* November 2007. P. 52-56.
4. **Распоряжение Правительства РФ** от 25.01.2018 № 84-р «Об утверждении стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года».
5. Промышленные сепараторы на магнитных жидкостях / В.В. Гогосов, Р.Д. Смолкин, В.С. Крохмаль и др. // *Магнитная гидродинамика.* 1994. № 1. С. 111-120.
6. Способы переработки электронного лома за рубежом. URL: [www.metal-archive.ru/metallurgiya-zolota-i-serebra/2611-sposoby-pererabotki-elektronnogo-loma-za-rubezhom.html](http://www.metal-archive.ru/metallurgiya-zolota-i-serebra/2611-sposoby-pererabotki-elektronnogo-loma-za-rubezhom.html) (дата обращения: 06.05.2021).
7. Извлечение цветных и благородных металлов из электронного лома: экономические показатели и стратегия ценообразования / Л.С. Стрижко, Ю.Ю. Костюхин, Г.В. Кружкова, Е.А. Иванова // *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2013. № 3. С. 28-33.
8. **Баркан М.** Технология извлечения драгоценных металлов из отходов электротехники / М. Баркан, М. Чиненкова. URL: [www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=233](http://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=233) (дата обращения: 06.05.2021).
9. Separation technology. URL: [www.cogelme.com](http://www.cogelme.com) (дата обращения: 06.05.2021).
10. **Пелевин А.Е.** Магнитные и электрические методы обогащения. Магнитные методы обогащения: учебник / А.Е. Пелевин; Урал. гос. горный ун-т. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. 296 с.
11. **Коняев А.Ю.** Исследование процессов электродинамической сепарации электронного лома / А.Ю. Коняев, Д.Н. Багин, Н.С. Якушев // *Экология и промышленность России.* 2015. Т. 19. № 4. С. 15-19.
12. **Коняев А.Ю.** Сепараторы для извлечения цветных металлов из ТКО / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, И.А. Коняев // *Твердые бытовые отходы.* 2017. № 3 (129). С. 36-39.
13. Non-ferrous metal separator. URL: [www.steinert.de](http://www.steinert.de) (дата обращения: 05.10.2020).

14. **Казаков Ю.Б.** Моделирование и исследование электротехнической системы регулируемой сепарации немагнитных материалов с использованием нанодисперсных магнитных жидкостей / Ю.Б. Казаков, Ю.И. Страдомский, В.А. Филиппов // Вестник ИГЭУ. 2011. № 2. С. 54-57.

15. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019616505 «Расчет траекторий немагнитных частиц в зоне разделения магнито-жидкостного сепаратора» / В.А. Филиппов // Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23.05.2019 г.

16. **Kazakov Yu.B.** Calculation of the performance of the electromagnetic magnetic fluid separator non-magnetic materials / Yu.B. Kazakov, V.A. Filippov // Advanced Problems of Electrotechnology: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. October 1-2, 2020. Yekaterinburg, Russian Federation. 2020. Vol. 950. № 012003. 8 p. doi:10.1088/1757-899X/950/1/012003.

17. Патент на изобретение № 2464101. Магнитогидростатический сепаратор / Ю.И. Страдомский, Ю.Б. Казаков, В.А. Филиппов. Зарегистр. в Гос. реестре изобретений РФ 20.10.2012 г. Опубл. 10.10.2012 // Бюл. № 28.

---

**Казаков Юрий Борисович** - доктор технических наук, профессор, действительный член Академии электротехнических наук РФ, заведующий кафедрой «Электромеханика» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

**Страдомский Юрий Иосифович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

**Филиппов Василий Александрович** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электромеханика» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

**Нестеров Сергей Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

**Yuri B. Kazakov** – Dr.Sc. Tech., Professor, Full Member of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation, Head: Department of Electromechanics, Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin (ISPU)

**Yuri I. Stradomsky** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electromechanics, Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin (ISPU)

**Vasily A. Filippov** – PhD (Technical Sciences), Senior Lecturer, Department of Electromechanics Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin (ISPU)

**Sergei A. Nesterov** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Electromechanics Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin (ISPU)

*Статья поступила в редакцию 14.07.21, принята к опубликованию 12.08.21*

УДК 621.793.71, 621.365.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОКА ИНДУКТОРА НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ТИТАНОВЫХ ПОКРЫТИЙ

Е.О. Осипова, О.А. Маркелова, В.А. Кошуро, А.А. Фомин

### EFFECTS OF INDUCTOR CURRENT ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THERMAL SPRAY COATINGS ON TITANIUM

E.O. Osipova, O.A. Markelova, V.A. Koshuro, A.A. Fomin

*В статье рассматривается процесс индукционно-термической модификации титановых покрытий, сформированных на титановых образцах методом электроплазменного напыления. Экспериментально установлено влияние тока индуктора в диапазоне от 3,5 до 8,0 кА на температуру обрабатываемых образцов. Результаты исследований показали, что при термической модификации в воздушной среде происходило изменение структуры и механических свойств титановых покрытий. Установлено, что с увеличением температуры нагрева увеличилась пористость с  $56\pm 2$  до  $61\pm 1$  %, толщина слоя снизилась с  $320\pm 30$  до  $114\pm 15$  мкм. За счет изменения структуры материала покрытия при окислении увеличилась микротвердость с 1035-1532 до 1825-1883  $HV_{0,98}$  в зависимости от тока индуктора и температуры обработки. Микротвердость подложки также увеличивается с изменением температуры обработки со 145 до 442  $HV_{0,98}$ .*

Ключевые слова: индукционно-термическая обработка, электроплазменное напыление, титан, микротвердость, покрытие

#### Введение

Конструкции восстановительной медицины зачастую производятся из сплавов на основе титана [1]. Для улучшения качества остеоинтеграции поверхность титанового имплантата подвергают модификации (тек-

*The article considers the induction heating modification technique of titanium coatings formed on titanium samples using electroplasma spraying methodology. The influence of inductor current in the range 3.5 to 8.0 kA on the temperature of the processed samples has been established experimentally. The research results showed that the structure and mechanical properties of titanium coatings change under thermal modification in the aerial environment. It was found that with an increase in the heating temperature, the porosity increased from  $56\pm 2$  to  $61\pm 1$  %, whereas the layer thickness decreased from  $320\pm 30$  to  $114\pm 15$   $\mu\text{m}$ . Due to the change in the structure of the coating material during oxidation, the microhardness increased from 1035-1532 to 1825-1883  $HV_{0,98}$ , depending on the inductor current and processing temperature. The microhardness of the substrate also increases with a change in the processing temperature from 145 to 442  $HV_{0,98}$ .*

Keywords: induction thermal treatment, electroplasma spraying, titanium, microhardness, coating

стурированию) или формируют покрытие, например титановое, которое по структуре подобно костной ткани. При этом нанесенные биосовместимые слои должны характеризоваться высокой адгезионно-когезионной прочностью [2, 3].

Покрyтия, формируемые газотермическим напылением, электрохимическим осаждением, вакуумными технологиями осаждения тонких пленок (CVD и PVD), широко применяются в биомедицине, авиастроении, машиностроении [4-6]. Газотермическое напыление отличается высокой производительностью, технологической простотой и поэтому получило широкое распространение в производстве. Титановые покрытия получают газотермическим напылением порошкового материала или распылением проволоки [7-10]. Морфология поверхности и механические характеристики сформированных слоев во многом зависят от технологии и режимов напыления [11-13].

Одним из методов газотермического напыления является электроплазменное напыление (ЭПН), позволяющее формировать титановые покрытия с пористостью 10-50 % и прочностью сцепления покрытия с основой до 20 МПа [14, 15]. Основными недостатками напыленных слоев являются неравномерность элементно-фазового состава, наличие дефектов структуры и остаточных напряжений в напыленном материале, что приводит к разрушению покрытия [16].

Для повышения функциональных свойств плазменных покрытий используются плакированные порошки [17], применяют предварительный индукционный нагрев подложки [18] или различные методы модификации: химическую обработку поверхности [19], электрофизическую, электротермическую или концентрированными потоками энергии [20-22]. При индукционно-термической обработке (ИТО) происходит одновременный нагрев покрытия и подложки. Данный процесс способствует изменению пористости, твердости и, вероятнее всего, адгезионно-когезионной прочности [23, 24]. ИТО позволяет формировать на титане наноструктурные металлооксидные слои, повышающие остеокондуктивные свойства поверхности имплантата [25].

Исследовательских работ, посвященных ИТО напыленных покрытий, недостаточно для дальнейшего развития технологий модификации поверхности. Поэтому цель данной работы заключалась в исследовании

влияния параметров ИТО, в частности тока индуктора и температуры обработки на структуру и твердость титановых покрытий, сформированных методом электроплазменного напыления.

### Материалы и методы исследований

Образцы для исследований представляли собой титановые диски диаметром 15 мм и толщиной 0,5 мм. Перед нанесением покрытия поверхность образцов подвергалась абразивно-струйной обработке на установке «Чайка-20» порошком электрокорунда дисперсностью 250-300 мкм при давлении  $4 \pm 0,5$  МПа. Очистка образцов от технологических загрязнений проводилась в растворе ПАВ с использованием ультразвуковой ванны «УЗУМИ-2». Покрытие формировалось электроплазменным напылением порошка титана марки ПТС дисперсностью 100-150 мкм с использованием установки «УПН-28». Использовались следующие режимы напыления: ток дуги плазмотрона – 350 А ( $\pm 1$  %); дистанция напыления –  $150 \pm 10$  мм; расход транспортирующего газа –  $10 \pm 5$  л/мин; расход плазмообразующего газа –  $25 \pm 5$  л/мин. ИТО образцов проводилась на установке «ВЧ-15» при постоянной выдержке 300 с и разной величине тока индуктора (см. таблицу).

Соответствие тока индуктора температуре обработки

№	Ток индуктора, кА	Температура, °С
1	3,5	750-800
2	4,8	900-950
3	8,0	1150-1200

Анализ структуры покрытия проводился растровым электронно-микроскопическим методом (РЭМ) с использованием микроскопа «MIRA 2 LMU». Размер структурных элементов, пористость и толщина формируемых слоев определялись по изображениям участков покрытий (ширина кадра 660 мкм) с использованием программы анализа геометрических параметров микрообъектов «Metallograph» [26].

Анализ микротвердости проводили на твердомере «ПМТ-3» при нагрузке на индентор Виккерса, равной 100 гс (ГОСТ 9450-76). Данная нагрузка обеспечивала необходимую визуализацию отпечатков на структурных элементах покрытия – напыленных и закристаллизовавшихся частицах (сплэтах).

### Результаты и обсуждение

В ходе плазменного напыления покрытие формировалось из отдельных титановых проплавленных частиц, расположенных послойно и образующих агломераты размером 100-200 мкм (рис. 1 *а*). Визуализировались дефекты покрытия в виде глубоких пор и трещин, характеризуемых суммарной пористостью поверхности  $56\pm 2\%$ . На поверхности крупных сплэтов были заметны отдельные частицы округлой формы размером до 20 мкм.

Термическая модификация в низкотемпературном диапазоне по 1-му режиму позволила снизить количество трещин.

Уменьшилось также количество отдельных частиц, что привело к возрастанию пористости до  $61\pm 1\%$  (рис. 1 *б*). Количество сферических частиц размером менее 5 мкм уменьшилось, в то время как число более крупных частиц величиной 10-50 мкм практически не изменилось. Возрастание температуры модификации до  $900-950^\circ\text{C}$  привело к заметному снижению количества пор, трещин и границ раздела структурных составляющих, при этом пористость составила  $55\pm 2\%$  (рис. 1 *в*). В структуре поверхности модифицированного покрытия преобладали частицы размером 30-40 мкм. Дальнейшее увеличение тока индуктора, а соответственно, и температуры обработки не привело к существенному изменению пористости, которая осталась равной  $56\pm 1\%$ . Форма отдельных структурных элементов покрытия изменилась с правильной на вермикулярную и призматическую (рис. 1 *г*). Изменение формы кристаллов на поверхности сплэтов сопровождалось заметным уменьшением доли частиц размером менее 40 мкм.

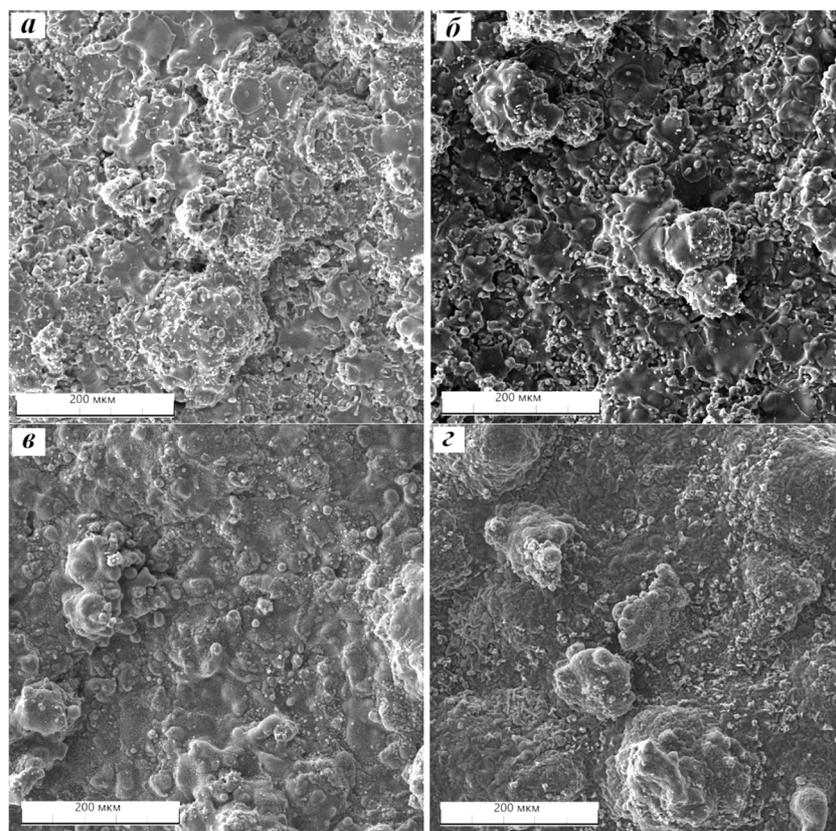


Рис. 1. РЭМ фотографии образцов:

*а* – плазменное покрытие (без ИТО); *б* –  $T = 750-800^\circ\text{C}$ ; *в* –  $T = 900-950^\circ\text{C}$ ; *г* –  $T = 1150-1200^\circ\text{C}$

Толщина исходного слоя, полученного электроплазменным напылением, составила  $320 \pm 30$  мкм. Микроиндентирование показало, что полученная пористая структура характеризовалась твердостью 1035-1530  $HV_{0,98}$  на глубине 200 мкм от границы раздела металл – основа (рис. 2). Микротвердость титановой основы образцов не превышала 145  $HV_{0,98}$ . После низкотемпературной модификации покрытия полученный слой подвергся окислению, и его толщина увеличилась до  $360 \pm 35$  мкм. Твердость данного покрытия на глубине 100-150 мкм достигла 1825  $HV_{0,98}$ ,

а на глубине 25 мкм (близкой к Ti основе) составляла 600  $HV_{0,98}$ . Термическая модификация в средне- и высокотемпературном диапазонах привела к уменьшению толщины покрытия до  $115 \pm 15$  мкм и  $190 \pm 25$  мкм и стабилизации микротвердости на уровне 1600  $HV_{0,98}$  и 1885  $HV_{0,98}$  соответственно. После термической обработки при 900-950° С твердость титановой основы возросла до 270  $HV_{0,98}$ . При наибольшей температуре ИТО твердость основы образцов достигла 440  $HV_{0,98}$ . Изменение твердости связано с окислением и формированием упрочненных диффузионных слоев.

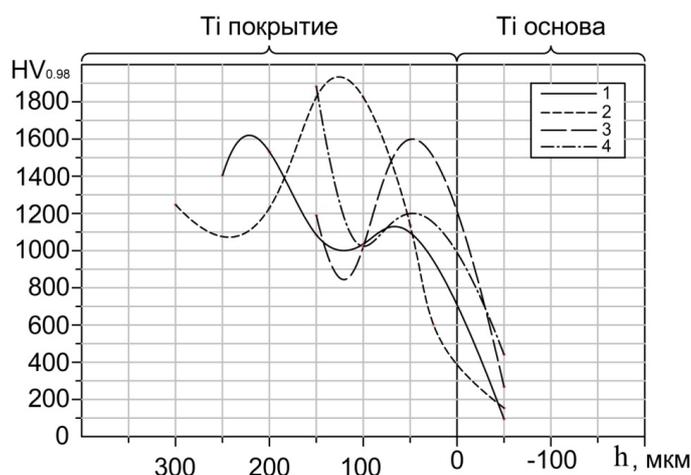


Рис. 2. Распределение микротвердости покрытия по глубине образца:  
1 – ЭПН покрытие; 2 –  $T = 750-800^\circ \text{C}$ ; 3 –  $T = 900-950^\circ \text{C}$ ; 4 –  $T = 1150-1200^\circ \text{C}$

### Заключение

Таким образом, электроплазменные покрытия обладали высокой суммарной пористостью около  $56 \pm 2\%$  при толщине  $320 \pm 30$  мкм. Полученная структура имела высокую микротвердость 1035-1530  $HV_{0,98}$ . Твердость титановой основы при данной обработке не превышала 145  $HV_{0,98}$ . Низкотемпературная ИТО при токе индуктора 3,5 кА, что соответствовало температуре 750-800° С, способствовала увеличению открытой пористости до  $61 \pm 1\%$  и толщины покрытия до  $360 \pm 35$  мкм. Микротвердость данного покрытия составляла 1100-1825  $HV_{0,98}$  и плавно снижалась до 600  $HV_{0,98}$  на границе контактного взаимодействия с титановой основой. Увеличение тока индуктора до 4,8 кА и температуры процесса до 900-950° С привело к снижению пористости до  $55 \pm 2\%$ . При мак-

симальном значении тока индуктора, равном 8,0 кА, а соответственно и температуры выдержки около 1150-1200° С, существенных изменений пористости не выявлено ( $56 \pm 1\%$ ). Отдельные структурные элементы покрытия приобрели вермикулярную и призматическую формы. Обработка при токе индуктора 4,8-8,0 кА привела к уменьшению толщины покрытия до  $114 \pm 15$  мкм и  $186 \pm 24$  мкм, микротвердость по сечению напыленного материала не превышала 1600-1880  $HV_{0,98}$ . Полученные покрытия могут найти применение при изготовлении титановых конструкций для восстановительной медицины.

*Статья подготовлена при выполнении научных исследований в рамках гранта Президента Российской Федерации № МД-965.2021.4.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Pohler O.E.M.** Unalloyed titanium for implants in bone surgery / O.E.M. Pohler // *Injury*. 2000. Vol. 31. P. D7-D13.
2. Нанесение электретного покрытия на поверхность титановой ножки эндопротеза тазобедренного сустава / Н.В. Чернюк, К.В. Овчинников, Л.С. Пинчук и др. // *Физика и химия обработки материалов*. 2009. № 1. С. 45-50.
3. **Корнилов Н.Н.** Эндопротезирование коленного сустава / Н.Н. Корнилов, Т.А. Куляба, К.А. Новосёлов. СПб.: Гиппократ, 2006. 463 с.
4. Osteoblastic cell response on high-rough titanium coatings by cold spray / A.M. Vilarde, N. Cinca, N. Garcia-Giralt et al. // *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 2018. Vol. 29. № 2. P. 1-10.
5. Properties of titanium thin films deposited by DC magnetron sputtering / Y.L. Jeyachandran, B. Karunakaran, S.K. Narayandass et al. // *Materials Science and Engineering: A*. 2006. Vol. 431. № 1-2. P. 277-284.
6. Study of Ti deposition onto Al alloy by cold gas spraying / N. Cinca, M. Barbosa, S. Dosta, J.M. Guilemany // *Surface and Coatings Technology*. 2010. Vol. 205. № 4. P. 1096-1102.
7. **Qian M.** Titanium powder metallurgy: science, technology and applications / M. Qian, F.H. Froes // *Butterworth-Heinemann*. 2015. 627 p.
8. A perspective on plasma spray technology / A. Vardelle, C. Moreau, N.J. Themelis, C. Chazelas // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2015. Vol. 35. P. 491-509.
9. **Benea M.L.** Characterisation of the TiO<sub>2</sub> coatings deposited by plasma spraying / M.L. Benea, L.P. Benea // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016. Vol. 106. № 1. P. 012024.
10. **Cizek J.** Medicine meets thermal spray technology: A review of patents / J. Cizek, J. Matejcek // *Journal of Thermal Spray Technology*, 2018. Vol. 27. № 8. P. 1251-1279.
11. Porosity and its significance in plasma-sprayed coatings / J.G. Odhiambo, W. Li, Y. Zhao, C. Li // *Coatings*. 2019. Vol. 9. № 7. P. 460.
12. Structure and shear strength of implants with plasma coatings / V.I. Kalita, A.I. Mamaev, V.A. Mamaeva et al. // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2016. Vol. 7. № 3. P. 376-387.
13. Microstructural investigation of porous titanium coatings, produced by thermal spraying techniques, using plasma atomization and hydride-dehydride powders, for orthopedic implants / P. Gkomoza, G.S. Lampropoulos, M. Vardavoulias et al. // *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 357. P. 947-956.
14. Characterization of thick titanium plasma spray coatings on PEEK materials used for medical implants and the influence on the mechanical properties / D. Vogel, H. Dempwolf, A. Baumann, R. Bader // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2018. Vol. 77. P. 600-608.
15. Structure and mechanical properties of three-dimensional capillary-porous titanium coatings on intraosteal implants / V.I. Kalita, D.I. Komlev, A.A. Radyuk // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2016. Vol. 7. № 4. P. 536-541.
16. **Кошуро В.А.** Состав и структура покрытия, полученного на титановом сплаве ВТ16 при комбинированной обработке методами электроплазменного напыления и микродугового оксидирования / В.А. Кошуро, Г.Г. Нечаев, А.В. Лясникова // *Журнал технической физики*. 2014. Т. 84. № 10. С. 153-155.
17. Керамический материал системы «оксид титана – оксид алюминия – твердая смазка» / В.А. Оковитый, О.Г. Девойно, А.Ф. Пантелеенко, В.В. Оковитый // *Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал*. 2011. № 1. С. 16-20.
18. Фазово-структурные и химические превращения на поверхности титана при плазменно-индукционном нанесении биокерамических покрытий / А.А. Фомин, М.А. Фомина, Е.Ю. Пошивалова и др. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2014. Т. 11. № 3. С. 303-311.

19. In vivo evaluation of plasma-sprayed titanium coating after alkali modification / W. Xue, X. Liu, X. Zheng, C. Ding // *Bio-materials*. 2005. Vol. 26. № 16. P. 3029-3037.

20. Pulsed laser modification of plasma-sprayed coatings: Experimental processing of hydroxyapatite and numerical simulation / S. Dyshlovenko, L. Pawlowski, I. Smurov, V. Veiko // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 201. № 6. P. 2248-2255.

21. Laser surface modification and characterization of air plasma sprayed alumina coatings / R. Krishnan, S. Dash, R. Kesavamoorthy et al. // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 200. № 8. P. 2791-2799.

22. Модификация плазменных износостойких покрытий импульсным лазером / В.А. Оковитый, Ф.И. Пантелеенко, А.И. Шевцов и др. // *Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал*. 2009. № 4. С. 49-53.

23. **Фролов В.Я.** Повышение эксплуатационных свойств плазменных покрытий методом индукционной термообработки / В.Я. Фролов, Е.А. Смирнова, Б.А. Юшин // *Металлообработка*. 2009. № 2. С. 28-33.

24. Структура и микротвердость титановых покрытий на имплантатах после индукционно-термической обработки / А.А. Фомин, В.И. Калита, В.А. Кошуро и др. // *Перспективные материалы*. 2016. № 12. С. 25-37.

25. Composition, structure and mechanical properties of the titanium surface after induction heat treatment followed by modification with hydroxyapatite nanoparticles / A. Fomin, S. Dorozhkin, M. Fomina et al. // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. № 9. P. 10838-10846.

26. Surface morphology data of tantalum coatings obtained by electrospark alloying / M. Fomina, V. Koshuro, V. Papshev et al. // *Data in Brief*. 2018. Vol. 20. P. 1409-1414.

**Осипова Елена Олеговна** – аспирант, ассистент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Маркелова Ольга Анатольевна** – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Кошуро Владимир Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Фомин Александр Александрович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Материаловедение и биомедицинская инженерия», проректор по науке и инновациям Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Elena O. Osipova** – Postgraduate, Teaching Assistant Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Olga A. Markelova** – PhD (Technical Sciences), Teaching Assistant, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Vladimir A. Koshuro** – Ph.D (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Aleksander A. Fomin** – Dr.Sc. (Tech.), Head: Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Vice Rector for Science and Innovation, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 01.07.21, принята к опубликованию 12.08.21*

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 621.3.048

## ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Л.Р. Гайнуллина, А.Р. Фасыхов

## INFLUENCE OF MECHANICAL IMPURITIES ON DIELECTRIC STRENGTH OF TRANSFORMER OIL

L.R. Gaynullina, A.R. Fasykhov

*Изучено влияние механических примесей на электрическую прочность трансформаторного масла ГК. Проведены замеры пробивного напряжения масла ГК и модельных смесей на его основе, содержащих различные концентрации мелкодисперсной меди, стали и волокон целлюлозы. Также для сравнения были проведены испытания на модельных смесях с добавлением воды. Установлено, что модельные смеси, содержащие волокна целлюлозы показали наихудшие значения пробивного напряжения, а соответственно электрической прочности. Электрическая прочность снизилась в 3,7 раза, в то время как в присутствии воды электрическая прочность снизилась в 1,77 раза.*

**Ключевые слова:** трансформаторное масло, механические примеси, электрические характеристики, электрическая прочность, пробивное напряжение

Основной причиной отказов силовых маслонаполненных трансформаторов, являющихся одним из показателей эксплуатационной надежности, является снижение электрической прочности трансформаторного масла [1]. Изоляционные дефекты приносят экономические убытки до 98 % [2]. Поскольку электроэнергетическое оборудование средних и высоких классов напряжения, в том числе трансформаторы,

*The influence of mechanical impurities on dielectric strength of HC transformer oil has been studied. The breakdown voltage of HC oil and its model mixtures containing different concentrations of fine copper, steel, and cellulose fibers were measured. The tests using model mixtures with addition of water were carried out for comparison purposes. It was found that the model mixtures containing cellulose fibers showed the worst values of the breakdown voltage and dielectric strength, respectively. The dielectric strength decreased by 3,7 times, while in the presence of water, the dielectric strength decreased by 1,77 times.*

**Keywords:** transformer oil, mechanical impurities, electrical characteristics, dielectric strength, breakdown voltage

является одним из наиболее дорогостоящих и ответственных видов оборудования электрических станций, вопрос повышения электрической прочности трансформаторного масла является актуальным.

Электрическая прочность, характеризующая пробивным напряжением трансформаторного масла, снижается в присутствии эмульгированной влаги и механических примесей. В процессе эксплуатации транс-

форматорного масла в его углеводородных соединениях происходит термохимическая деструкция компонентов, в результате которой образуются продукты старения масла, в том числе механические примеси и вода, причем с повышением температуры масла эмульгированная вода переходит в растворенное состояние. В этом случае помимо осушки масла важно не допускать его резкого охлаждения в процессе эксплуатации [3]. Механические примеси, асфальтовые осадки, мыловые осадки, углистые осадки, коллоидные вещества, волокна целлюлозной изоляции присутствуют в масле на стадии заливки его в оборудование либо образуются в процессе эксплуатации под влиянием повышенных температур и напряженности электрического поля.

При изготовлении масляных трансформаторов применяют различные виды твердых изоляционных материалов – электротехнический картон, кабельная бумага и т.д. Из электротехнического картона изготавливают изоляционные шайбы, прокладки, создают в масле барьеры, повышающие электрическую прочность изоляционных промежутков. Кабельная бумага является изоляционным материалом медного обмоточного провода и отводов высокого напряжения.

Доля твердой (целлюлозной) изоляции в трансформаторах составляет 8 % от массы всего аппарата [4]. Поверхность соприкосновения целлюлозной изоляции с маслом приблизительно составляет  $0,5-1,0^2$  см на 1 г масла для различных типов трансформаторов. Соответственно, при деградации бумажной изоляции достаточно большое количество волокон целлюлозы поступает в объем масла.

Загрязнителями масла являются и конструкционные металлы (медь, сталь), используемые для обмоток, шин, изготовления баков, опорных, крепежных деталей и других узлов трансформатора. Эти металлы образуют осадок и ускоряют окислительные процессы.

Проведены исследования по влиянию механических примесей в целом на пробивное напряжение трансформаторного масла [5], установлена связь размеров частиц механи-

ческих примесей и пробивного напряжения [6]. Однако не изучено влияние отдельных компонентов (природы) механических примесей и их концентрации на электрические показатели. Исследование этого аспекта позволит оптимизировать оборудование очистки трансформаторного масла.

Цель работы – изучение влияния природы и концентрации механических примесей на электрическую прочность трансформаторного масла.

Электрическая прочность равна отношению пробивного напряжения к расстоянию между электродами. Для расчета электрической прочности трансформаторного масла гидрокрекинга (ГК) были произведены замеры пробивного напряжения на высоковольтном приборе АИМ-80 по ГОСТ 6581-75 образцов масла с механическими примесями в различной концентрации. Эксперименты были проведены при температуре 25°C с чистым маслом ГК, на модельных смесях масла ГК с мелкодисперсной сталью, с мелкодисперсной медью, с волокнами целлюлозы и с водой в эмульгированном состоянии. Концентрация механических примесей менялась в интервале 0,006-0,054 г / 100 г масла. Концентрация воды составляла 0-20 г / т масла (0-0,002 г / 100 г масла).

На электрическую прочность диэлектриков, в частности трансформаторного масла, влияет неоднородность поля, химические изменения в диэлектрике и т.д., поэтому пробой может возникать при разном напряжении. Следовательно, пробивное напряжение необходимо определять средним значением. В данной работе среднее значение определялось по результатам шести измерений. С учетом полученных результатов измерений пробивного напряжения и расстояния между электродами 2,5 мм были рассчитаны показатели электрической прочности.

На рис. 1 приведены зависимости электрической прочности от концентрации мелкодисперсной стали и меди, на рис. 2 – от концентрации волокон целлюлозы. На обоих рисунках для сопоставления результатов приведена электрическая прочность чистого масла ГК.

На рис. 3 приведена зависимость электрической прочности трансформаторного масла ГК от количества воды в нем. Кон-

центрация воды в модельной смеси менялась от 0 до 20 г/т.

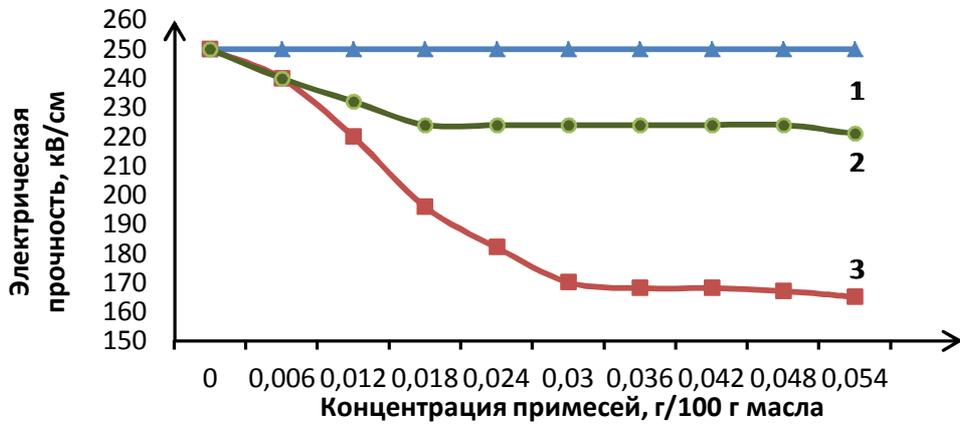


Рис. 1. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от концентрации примесей: 1 – чистое масло ГК; 2 – масло ГК + сталь; 3 – масло ГК + медь

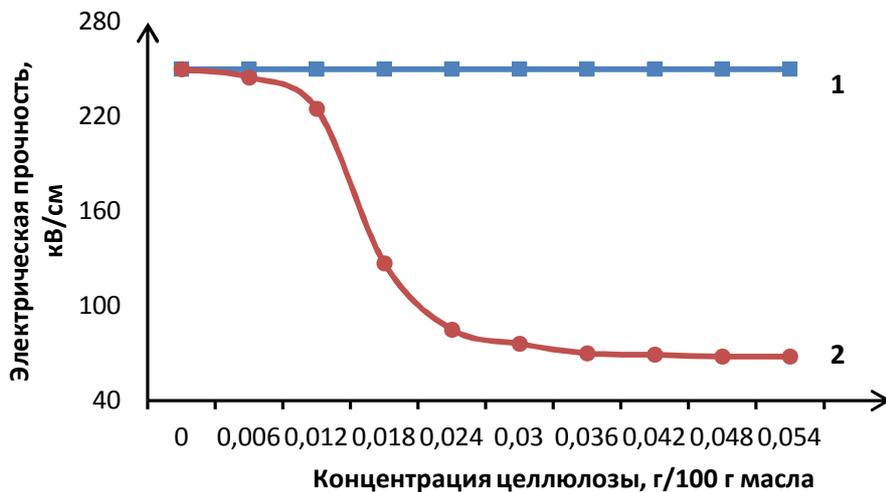


Рис. 2. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от концентрации волокон целлюлозы: 1 – чистое масло ГК; 2 – масло ГК + целлюлоза

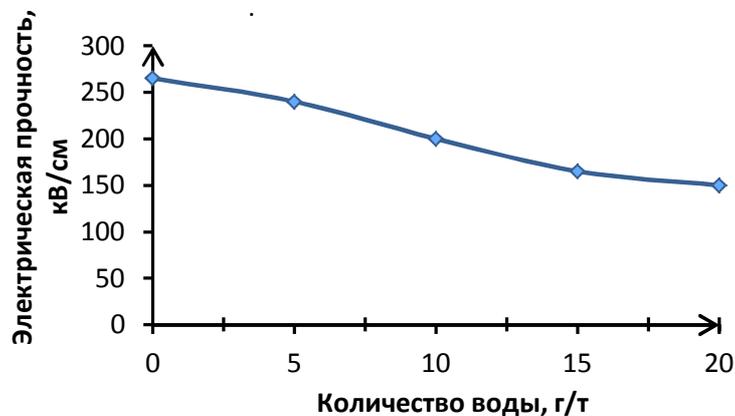


Рис. 3. Зависимость электрической прочности от концентрации воды в масле

Результаты исследования показали, что электрическая прочность трансформаторного масла ГК в присутствии примеси стали снижается незначительно, показатели стабильны, что свидетельствует об отсутствии необходимости очистки масла от частиц стали, тем более, что сталь не оказывает влияния на окисление масла. Присутствие медных частиц помимо ускорения окислительного процесса влияют и на пробивное напряжение, которое меняется в рассматриваемом интервале концентраций в 1,52 раза по сравнению с чистым маслом. При концентрации 0,054 г / 100 г масла его электрическая прочность снижается до 164 кВ/см, что при расстоянии между электродами 2,5 мм соответствует пробивному напряжению 41 кВ. Пробивное напряжение чистого масла составляет не менее 60 кВ.

Значительное снижение электрической прочности трансформаторного масла ГК происходит в присутствии волокон целлюлозы. При концентрации от 0,012 г / 100 г масла происходит резкое снижение показателя до 68 кВ/см (при 0,054 г / 100 г масла). По сравнению с чистым маслом значение электрической прочности масла снижается в 3,7 раза. Пробивное напряжение при концентрации 0,054 г / 100 г масла составляет 17 кВ.

Также была проведена серия измерений пробивного напряжения смеси, состоящей из трансформаторного масла, мелкодисперсной стали и меди, и целлюлозы для исследования их одновременного воздействия на электрическую прочность масла. Повышение концентрации металлов во взвешенном состоянии оказывает незначительное влияние на электрическую прочность масла по сравнению с целлюлозой. Увеличение количества целлюлозных волокон в объеме масла в присутствии взвеси мелкодисперсных металлов снижает электрическую прочность трансформаторного масла до 68 кВ/см.

Присутствие эмульгированной воды в трансформаторном масле в концентрации 0-0,002 г / 100 г масла уменьшает его электрическую прочность в 1,77 раза (рис. 3).

Таким образом, помимо осушки трансформаторного масла следует обратить особое внимание на целлюлозные примеси. Задачу усложняет факт присутствия целлюлозных волокон и на стадии заливки свежего масла в маслonaполненное электрооборудование, и в процессе его эксплуатации в результате деградации твердой бумажной изоляции.

### Выводы:

1. Изучено влияние механических примесей (их природы и концентрации) на электрическую прочность трансформаторного масла ГК.

2. Для модельных смесей с мелкодисперсной сталью, медью и волокнами целлюлозы в концентрации 0,006-0,054 г / 100 г масла были замерены показатели пробивного напряжения и рассчитана электрическая прочность масла.

3. Проведены измерения пробивного напряжения и рассчитаны электрическая прочность трансформаторного масла ГК в зависимости от количество воды в нем.

4. Установлено, что модельные смеси, содержащие волокна целлюлозы, показали наихудшие значения пробивного напряжения, а соответственно электрической прочности. Электрическая прочность снизилась в 3,7 раза, в то время как в присутствии воды электрическая прочность снизилась в 1,77 раза.

5. Модельные смеси, содержащие одновременно мелкодисперсную сталь и медь, а также целлюлозу показали преобладающее влияние целлюлозы и снижение электрической прочности трансформаторного масла до 68 кВ/см.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Митькин Ю.А. Диагностические статистические характеристики напряжений масла действующих силовых транс-

форматоров 110 кВ / Ю.А. Митькин, О.С. Мельникова // Вестник ИГЭУ. 2016. Вып. 3. С. 40-46.

2. **Пуликов П.Г.** Разработка и исследование датчика механических примесей в трансформаторном масле / П.Г. Пуликов // Диагностика и надежность энергооборудования. 2012. № 1 (43). С. 31-35.

3. **Фасыхов А.Р.** Характеристики механических примесей трансформаторных масел / А.Р. Фасыхов, Л.Р. Гайнуллина // Электронный сборник статей по материалам LXXXIV студенческой международной научно-практической конференции. Новосибирск: СибАК, 2019. № 12 (83). С. 174-177 [Электронный ресурс]. URL: [https://sibac.info/archive/technic/12 % 2883 %29.pdf](https://sibac.info/archive/technic/12%202883%2029.pdf)

4. **Гарифуллин М.Ш.** Диагностика состояния бумажной изоляции по ИК-

спектрам отражения и спектрам люминесценции / М.Ш. Гарифуллин // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. № 5-6. С. 57-65.

5. **Yusupov D.T.** Influence of various impurities on electric strength of transformer oil and method of removal / D.T. Yusupov // Power engineering: economics, technique, ecology. 2018. № 2. P. 58-63.

6. **Мельникова О.С.** Влияние распределения частиц примесей на электрическую прочность трансформаторного масла / О.С. Мельникова // Вестник ИГЭУ. 2019. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-raspredeleniya-chastits-primesei-na-elektricheskuyu-prochnost-transformatornogo-masla> (дата обращения: 24.07.2021).

**Гайнуллина Лейсан Раисовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» Казанского государственного энергетического университета

**Фасыхов Айдар Равилевич** – магистрант кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» Казанского государственного энергетического университета

**Leysan R. Gainullina** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Energy Supply of Enterprises and Energy-Saving Technologies, Kazan State Power Engineering University

**Aydar R. Fasykhov** – Master Student, Department of Power Supply of Enterprises and Energy-Saving Technologies, Kazan State Power Engineering University

*Статья поступила в редакцию 29.07.21, принята к опубликованию 26.08.21*

УДК 535.566

## МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕДПРОБИВНЫХ ПОЛЕЙ В ЖИДКОСТИ

Ю.А. Кузнецова, В.Б. Ясинский, С.М. Коробейников

## SIMULATION OF PRE-BREAKDOWN FIELDS IN LIQUIDS

Yu.A. Kuznetsova, V.B. Yassinskiy, S.M. Korobeynikov

*В статье описана методика расшифровки экспериментальных керрограмм методом компьютерного моделирования условий, в которых они были получены. Расшифровка представляет собой решение обратной задачи восстановления поля напряжённости путём решения прямой задачи. В математической модели полностью воспроизводились условия реального эксперимента, и строилась матрица относительных интенсивностей. Для визуализации результатов расчёта был разработан специальный алгоритм, итогом которого было получение картины керровских полос, которая сравнивалась с экспериментальной. В случае несовпадения картин условия корректировались, и итерационный процесс продолжался до совпадения расчётной и экспериментальной керрограмм. В модель можно внести микропузырьки, объёмный заряд и стример. Разработанная методика, в случае наличия осциллограммы напряжения, позволяет воспроизводить не только статические картины полос Керра, но и хронограммы. Математическая модель позволяет не только ускорить обработку керрограмм, но и получить дополнительную информацию о процессах, происходящих на предпробивной стадии в приэлектродной зоне. Что будет способствовать лучшему пониманию предпробивных процессов в жидкой изоляции высоковольтных энергоустановках.*

**Ключевые слова:** *пробой жидкостей, предпробивная стадия, электрооптический эффект Керра, двулучепреломление, разность фаз, микропузырьки, объёмный заряд, математическое моделирование*

*The article describes a technique for decoding experimental kerrograms by computer modeling of the conditions under which they were obtained. Decoding is a solution to the inverse problem associated with reconstruction of the intensity field by solving the direct problem. The conditions for a real-life experiment, including the matrix of relative intensities were simulated in the mathematical model. A special algorithm was developed to visualize the calculation results, which was aimed to obtain a pattern of the Kerr bands, which was compared with the experimental pattern. In the case of mismatch between the patterns, the conditions were corrected, and the iteration process continued until the calculated and experimental kerrograms became similar. Microbubbles, a space charge, and streamer can be included in the model. The developed technique, in the presence of a voltage oscillogram, allows reproducing not only static Kerr band patterns, but also chronograms. The mathematical model can speed up both the procedure of kerrograms processing, and also obtain additional information relating the processes found at the pre-breakdown stage in the near-electrode zone. This will contribute to a better understanding of pre-breakdown processes in liquid insulation of high-voltage power plants.*

**Keywords:** *breakdown of liquids, pre-breakdown stage, electro-optical Kerr effect, birefringence, phase shift, microbubbles, space charge, mathematical simulation*

**Введение**

Аварии и нештатные ситуации на крупных объектах энергетики влекут за собой серьёзные социально-экономические и технические последствия. Для решения возникающих проблем необходимо хорошее понимание процессов, происходящих на предпробойной стадии внутри маслонеполненных установок. Развитие теорий о пробоях жидкостей насчитывает порядка 150 лет. Но всерьёз подлинный интерес к исследованиям в этом направлении появился с развитием высоковольтной трансформаторной техники. Тогда были очень популярны исследования разряда в жидкостях с применением методов высокоскоростной съёмки. Однако несовершенство, малое разрешение и чувствительность фотокамер с механической развёрткой затрудняли развитие этого направления.

Во второй половине XX столетия начался рост интереса к применению высоковольтных микро- и наносекундных импульсов в различных областях науки и техники привёл к созданию мощных высоковольтных установок. Именно к такого рода технике предъявляются высокие требования к изолирующим средам. В этот же период времени начинается и эра электрооптических методов исследования разрядных промежутков.

Благодаря своим диэлектрическим свойствам в качестве модели жидкой изоляции высоковольтной аппаратуры хорошо подходил нитробензол. Именно с ним и проводились первые электрооптические эксперименты [1-5]. После отработки мето-

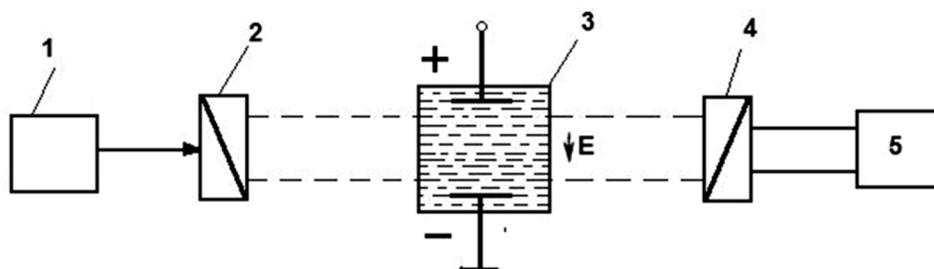
дик экспериментальных исследований они были проведены и для других жидкостей. В связи с разработкой ёмкостных накопителей энергии большое внимание уделялось и исследованиям пробоя воды [6, 7]. Тем не менее, несмотря на достаточно большое количество экспериментальных данных, до сих пор не удалось прийти к единой теории, и цельного представления о механизмах исследуемых процессах при пробое жидкости нет [4]. Более того, одни и те же данные могут быть использованы приверженцами противоположных теорий.

Электрооптический эффект Керра впервые был использован для определения распределения электрического поля при импульсном воздействии напряжения в очищенном хлорбензоле в 1956 году в University of Birmingham. Первая электрооптическая хронограмма пробоя воды была получена в 1978 г. в Новосибирске [8].

Отличительной особенностью эффекта Керра является его сверхвысокое быстродействие – временное разрешение в жидкости лучше  $10^{-12}$  с.

Суть метода заключается в приобретении жидкостью свойств одноосного кристалла с оптической осью, направленной вдоль поля.

Исследуемая жидкость помещается в измерительную ячейку со скрещенными поляризаторами (рис. 1), на электроды которой подаётся высокое напряжение. При попадании в такую жидкость луч света разделяется на два луча с ортогональной поляризацией.



**Рис. 1.** Принципиальная оптическая схема исследований с помощью электрооптического эффекта Керра

Поляризованный луч света, образуемый с помощью источника света 1 и поляризатора 2,

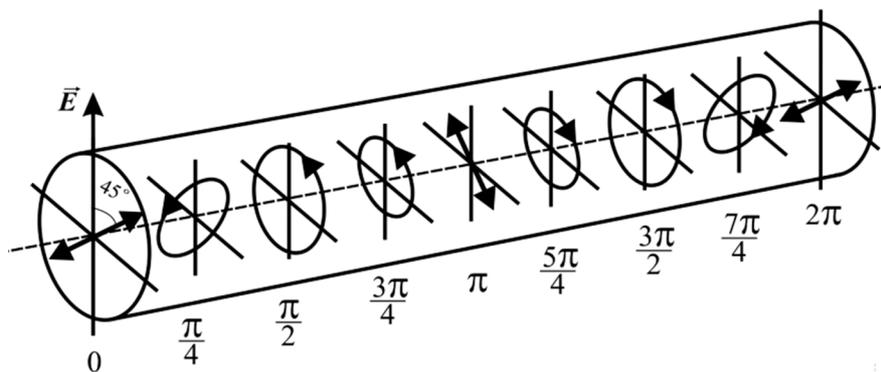
проходит через электрическое поле, создаваемое конденсатором 3, к электродам которо-

го приложено напряжение, которое создаёт в ячейке электрическое поле и индуцирует в исследуемой жидкости оптическую ось. При этом луч света направлен перпендикулярно вектору напряжённости этого поля, а плоскость поляризации падающего света повернута на угол  $45^\circ$  к вектору напряжённости электрического поля. После анализатора 4 свет попадает в фотоприёмник 5. В качестве последнего часто используют оптическую систему регистрации (фотоплёнку и ПЗС-матрицу). При недостатке освещённости нередко применяются электронно-оптические преобразователи (ЭОП).

Если объект исследований стационарный, то зондирующий луч сдвигается с некоторым шагом и сканируется вся интересующая область. В случае нестационарного объекта такой метод не подходит. В этом случае объект просвечивается расширенным коллимированным лазерным пучком,

а распределение интенсивности по всему сечению пучка фиксируется на фотослой или ПЗС-матрицы. Полученная картина линий равной разности фаз и называется керрограммой [7].

Ориентирование плоскости зондирующего излучения под углом  $45^\circ$  к вектору напряжённости электрического поля приводит к тому, что свет из линейно-поляризованного сначала превращается в эллиптически поляризованный, затем в поляризованный по кругу (рис. 2), а потом снова в эллиптически поляризованный, затем в линейно-поляризованный, но повернутый относительно входящего на  $90^\circ$  и так далее. Если угол между плоскостью поляризации и вектором электрического поля  $\varphi_0 \neq 45^\circ$ , то круговая поляризация не возникает нигде, эффект Керра становится менее выраженным, а чувствительность метода снижается.



**Рис. 2.** Преобразование вида поляризации света с плоскостью поляризации, ориентированной под углом  $45^\circ$  к направлению электрического поля, в зависимости от набега фазы при его прохождении через жидкость в ячейке Керра.  
 $E$  – направление вектора напряжённости электрического поля

Показатели преломления для лучей света с различной поляризацией будут различаться:

$$n_e = n + 2/3 \cdot \lambda \cdot B \cdot E^2$$

$$\text{и } n_o = n - 1/3 \cdot \lambda \cdot B \cdot E^2, \quad (1)$$

где  $n_e$  – показатель преломления необыкновенного луча;  $n_o$  – показатель преломления обыкновенного луча;  $n$  – показатель преломления в отсутствие поля;  $\lambda$  – длина волны света;  $B$  – постоянная Керра,  $E$  – напряжённость поля.

Выражение (1) являются приближёнными и получены разложением в ряд зависимости показателя преломления от поля  $n(E) = n + \alpha \cdot E^2 + \beta \cdot E^4$  с учётом членов, содержащих  $E^2$ , и справедливы при выполнении условия:

$$\lambda \cdot B \cdot E^2 \ll n. \quad (2)$$

Для нитробензола и рубинового лазера формальная оценка с помощью (2) применимости выражений (1) даёт:  $E \ll \sqrt{n/(\lambda \cdot B)} =$

= 9 МВ/см, то есть формулами (1) можно пользоваться, если  $E \leq 9$  МВ/см.

Между обыкновенным и необыкновенным лучами из-за различной их скорости в жидкости ( $v_e = c/n_e$  и  $v_o = c/n_o$ ) возникает разность фаз  $\Delta\Phi$ , которая после прохождения в среде расстояния  $l$  равна

$$\Delta\Phi = 2\pi(n_e - n_o) \cdot l / \lambda. \quad (3)$$

С учётом выражений (1) получаем для разности фаз:  $\Delta\Phi = 2 \cdot \pi \cdot B \cdot l \cdot E^2$ .

Тогда в соответствии с законом Малюса интенсивность света, вышедшего из анализатора

$$I = I_0 \sin^2(\Delta\Phi/2)$$

или

$$I = I_0 \sin^2(\pi \cdot B \cdot l \cdot E^2). \quad (4)$$

Таким образом, по измерению интенсивности прошедшего света можно определить напряжённость электрического поля и напряжение, приложенное к образцу.

В случае однородных полей данный экспериментальный метод работает хорошо, и с его помощью получают однозначные результаты. Однако при сильно неоднородных полях ситуация усложняется. Дело в том, что керрограмма искажается наличием дополнительного объёмного заряда, возникающего в разрядном промежутке при импульсном воздействии, а область возмущённой зоны обычно не имеет симметрии или она слабо выражена. Поэтому чаще всего эффект Керра используется для изучения объектов с аксиальной симметрией.

В силу квадратичной зависимости интенсивности от напряжённости поля измеренная интенсивность прошедшего через ячейку света, не зависит от направления поля. Разность фаз  $\Delta\Phi$  образуется за счёт оптической разности хода обыкновенного и необыкновенного лучей на всём их пути через оптическую неоднородность. Следовательно, задачу восстановления распределения напряжённости электрического поля по керрограмме можно отнести к классу некорректно поставленных, для решения которых нужна априорная информация.

В этом случае полученные выше уравнения заменяются на более сложные:

$$\Delta\Phi(x, y, t) = 2\pi \cdot B \cdot \int E^2(x, y, t) dx; \quad (5)$$

$$I(x, y, t) = I_0 \cdot \sin^2\left(\pi \cdot B \cdot \int E^2(x, y, t) dx\right); \quad (6)$$

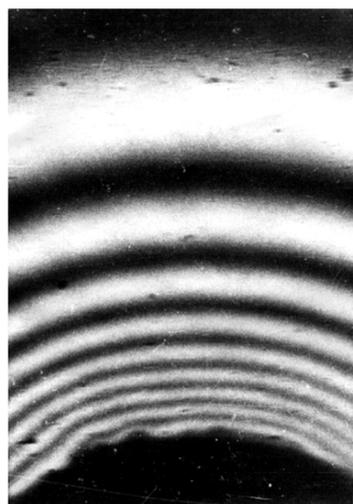
$$\int E^2(x, y, t) dx = (\pi \cdot B)^{-1/2} \arcsin\left(\frac{I(x, y, t)}{I_0}\right). \quad (7)$$

Именно они и позволяют определять пространственно-временные характеристики электрического поля по анализу картины распределения интенсивности света, прошедшего через исследуемую ячейку.

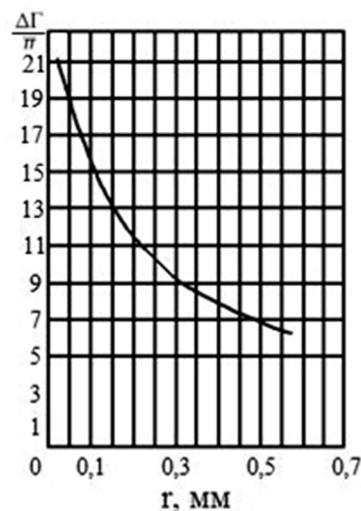
Из уравнений (5)-(7) видно, что восстановить по керрограмме распределение напряжённости электрического поля, а также разности фаз является непростой задачей. На рис. 3 показаны результаты восстановления распределения разности фаз  $\Delta\Phi/\pi$  по оси симметрии. Для этого надо было определить реперную полосу, в которой фаза близка к нулю, и уже от неё вести отсчёт. То есть картинка должна иметь достаточные размеры и включать области, практически не подверженные возмущениям. Анализ же всей керрограммы требует огромных трудозатрат. И это касается только определения разности фаз. Восстановление поля напряжённости не менее трудозатратно, да и точность получаемых результатов оставляет желать лучшего.

Развитие компьютерных технологий в последние годы привело к тому, что появилась возможность не только ускорить процесс расшифровки керрограмм, но получить из них дополнительную информацию, которую было очень трудно, а то и невозможно извлечь из керрограмм при ручной обработке.

Именно восстановление пространственно-временных характеристик электрических предпробивных полей методами математического моделирования по результатам электрооптических измерений и является целью работы.



а



б

Рис. 3. Распределение керровских полос у острия-анода (а) и восстановленное из него распределение набегов фаз (б) по оси симметрии системы [9] –  $\Delta\Gamma/\pi$  набег фазы

### 1. Алгоритм моделирования

Математическое моделирование результатов использования эффекта Керра для восстановления поля напряжённости уже проводилось в работах [10-12], однако там рассматривались только общие случаи, а анализ этим способом реальных экспериментальных результатов не проводился.

Для достижения поставленной цели прямую задачу восстановления поля напряжённости с керрограммы мы стали решать путём решения обратной задачи. Был выбран следующий алгоритм исследований.

Из большого набора имеющихся экспериментальных результатов выбирались только те, описания которых позволяли полностью восстановить условия, в которых проводились эксперименты.

Далее для построения математической модели строился 3D-образ реальной измерительной ячейки, и полностью воспроизводились условия эксперимента. Расчёты проводились методом конечных элементов. Были рассмотрены различные ситуации, возникающие приэлектродной зоне. С этой целью в неё вводились воздушные и ионизированные пузырьки, объёмный заряд, модели стримера. Геометрию электродной системы, форму и размеры измерительной ячейки, диапазон и закон изменения прикладываемого напряжений, род жидкости и

пространственное разрешение при расчётах можно было менять в широких пределах.

Так, при расчётах в электродной системе остриё – плоскость, прилегающая к острию зона послойно последовательно сканировалась в плоскости XOY вдоль оси Y с заданным шагом по оси X. Затем плоскость сканирования смещалась по оси симметрии ячейки Z, и сканировался следующий слой (рис. 4). Шаг сканирования по обеим осям варьировался от 2,5 до 10 мкм.

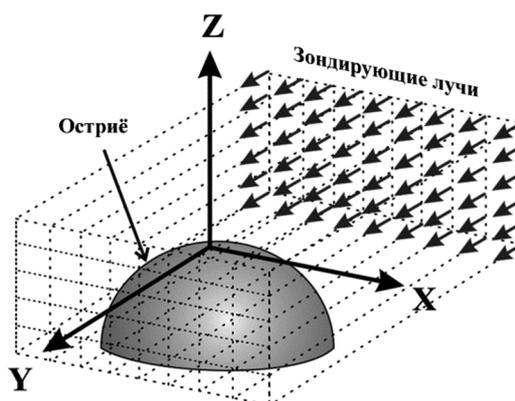


Рис. 4. Геометрия расчётной модели в системе остриё-плоскость: Z – ось симметрии, Y – направление зондирования

После прохождения ячейки Керра относительная интенсивность  $I(x, z)/I_0$  лазерного излучения меняется по закону

$$\frac{I(x, z)}{I_0} = \sin^2 \left( \pi \cdot B \cdot \int E^2(y) dy \right), \quad (8)$$

$$\frac{I(x, z)}{I_0} = \sin^2 \left( \pi \cdot B \cdot \int E_{\perp}^2(y) dy \right). \quad (10)$$

где  $B$  – постоянная Керра.

В работе [13] было показано, что в системе остриё – плоскость в приборной зоне вектор напряжённости электрического поля  $E$  практически совпадает со своей проекцией  $E_{\perp}$  на ось симметрии, а из-за сильной неоднородности поля в этой электродной системе вклад набега фазы  $\Delta\Phi$  на всём пути зондирующего луча через измерительную ячейку не превышает 5%. Поэтому можно положить  $E \approx E_{\perp}$ , и формулы (5) и (8) переписать в виде

$$\Delta\Phi(x, z) = 2\pi \cdot B \cdot \int E_{\perp}^2(y) dy; \quad (9)$$

Именно формулы (9) и (10) использовались в процессе моделирования.

## 2. Методика визуализации керрограмм

Из-за аксиальной симметрии электрического поля расчёты проводились только для одной из половин исследуемой области с некоторым шагом, величина которого бралась в зависимости от поставленной задачи и менялась от 2,5 до 10 мкм по обеим осям –  $X$  и  $Z$ . Полученные по каждому выделенному направлению результаты  $I(x, z)/I_0$ , сводились в двумерную матрицу  $\|z, x\|$  – (рис. 5).

Z \ X	0,110	0,105	0,100	0,095	0,090	0,085	0,080	0,075	0,070	0,065	0,060	0,055	0,050	0,045	0,040	0,035	0,030	0,025	0,020
0,000	0,97	0,96	0,66	0,28	0,03	0,04	0,31	0,68	0,96	0,96	0,67	0,27	0,01	0,11	0,53	0,92	0,97	0,54	0,05
0,005	0,97	0,96	0,67	0,28	0,03	0,04	0,30	0,68	0,96	0,96	0,69	0,28	0,01	0,10	0,51	0,91	0,97	0,55	0,05
0,010	0,96	0,97	0,68	0,30	0,04	0,03	0,28	0,67	0,95	0,97	0,71	0,29	0,02	0,09	0,48	0,89	0,98	0,57	0,05
0,015	0,95	0,97	0,70	0,31	0,05	0,02	0,26	0,64	0,94	0,98	0,73	0,33	0,03	0,07	0,44	0,86	0,99	0,57	0,06
0,020	0,94	0,98	0,73	0,34	0,07	0,01	0,23	0,61	0,92	0,99	0,77	0,38	0,05	0,04	0,59	0,83	0,99	0,63	0,10
0,025	0,92	0,99	0,77	0,38	0,08	0,00	0,19	0,56	0,89	1,00	0,81	0,44	0,08	0,02	0,33	0,79	1,00	0,69	0,16
0,030	0,90	1,00	0,81	0,43	0,11	0,00	0,14	0,49	0,84	1,00	0,86	0,51	0,13	0,01	0,26	0,72	1,00	0,78	0,26
0,035	0,86	1,00	0,85	0,48	0,15	0,00	0,11	0,41	0,79	0,99	0,91	0,58	0,19	0,00	0,18	0,63	0,97	0,88	0,58
0,040	0,82	1,00	0,90	0,56	0,21	0,01	0,07	0,34	0,71	0,97	0,95	0,67	0,27	0,02	0,10	0,50	0,91	0,95	0,53
0,045	0,77	0,98	0,94	0,63	0,28	0,03	0,04	0,28	0,63	0,94	0,98	0,75	0,39	0,06	0,04	0,38	0,82	0,99	0,68
0,050	0,70	0,96	0,97	0,71	0,35	0,07	0,01	0,20	0,54	0,87	1,00	0,85	0,51	0,13	0,01	0,25	0,69	0,99	0,83
0,055	0,63	0,91	1,00	0,80	0,45	0,13	0,00	0,13	0,44	0,78	0,99	0,93	0,63	0,23	0,00	0,14	0,54	0,93	0,95
0,060	0,54	0,85	1,00	0,88	0,56	0,21	0,01	0,06	0,32	0,66	0,94	0,98	0,75	0,36	0,04	0,05	0,37	0,81	1,00
0,065	0,44	0,76	0,98	0,95	0,67	0,35	0,06	0,01	0,20	0,53	0,85	1,00	0,87	0,51	0,13	0,00	0,20	0,62	0,97
0,070	0,34	0,66	0,92	0,99	0,78	0,44	0,14	0,00	0,10	0,39	0,74	0,98	0,96	0,67	0,28	0,03	0,06	0,41	0,84
0,075	0,24	0,34	0,85	1,00	0,88	0,57	0,25	0,03	0,03	0,24	0,60	0,91	1,00	0,83	0,48	0,13	0,00	0,20	0,64
0,080	0,15	0,41	0,74	0,97	0,96	0,71	0,37	0,10	0,00	0,13	0,44	0,79	0,99	0,95	0,68	0,31	0,04	0,05	0,40
0,085	0,07	0,29	0,61	0,90	1,00	0,83	0,52	0,20	0,02	0,04	0,28	0,63	0,91	1,00	0,86	0,52	0,17	0,00	0,17
0,090	0,02	0,18	0,47	0,79	0,99	0,93	0,67	0,34	0,08	0,00	0,14	0,44	0,77	0,98	0,97	0,74	0,38	0,08	0,02
0,095	0,00	0,09	0,33	0,65	0,92	0,99	0,81	0,51	0,21	0,02	0,04	0,26	0,58	0,87	1,00	0,91	0,62	0,25	0,01
0,100	0,02	0,03	0,20	0,48	0,81	0,99	0,92	0,68	0,36	0,10	0,00	0,11	0,37	0,70	0,94	1,00	0,83	0,49	0,15
0,105	0,07	0,00	0,10	0,33	0,66	0,93	0,99	0,84	0,55	0,24	0,03	0,02	0,18	0,48	0,78	0,97	0,97	0,75	0,40
0,110	0,16	0,02	0,02	0,18	0,49	0,81	0,99	0,95	0,74	0,43	0,15	0,01	0,05	0,27	0,56	0,84	0,99	0,94	0,69
0,115	0,28	0,08	0,00	0,08	0,31	0,65	0,92	1,00	0,89	0,64	0,33	0,09	0,00	0,09	0,32	0,61	0,87	1,00	0,92
0,120	0,43	0,19	0,03	0,02	0,16	0,46	0,77	0,97	0,98	0,83	0,55	0,26	0,05	0,01	0,12	0,36	0,64	0,89	1,00

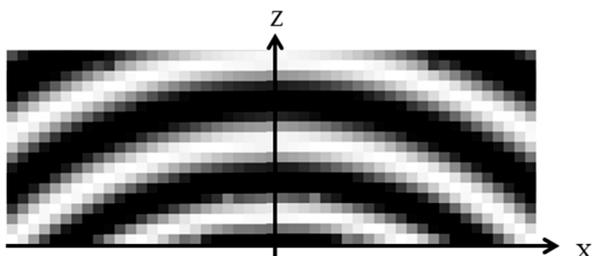
Рис. 5. Фрагмент матрицы  $\|z, x\|$  с относительными интенсивностями  $I(x, z)/I_0$ .  
Поле регистрации от 0 до 120 мкм по оси  $X$  и от 20 до 110 мкм по оси  $Z$

Полученная матрица вследствие аксиальной симметрии отражает лишь половину картинки вместе с осевой линией  $X=0$ . После визуализации и обработки специально разработанной программой керрограмма, заданная матрицей  $\|z, x\|$ , приобретает следующий вид (рис. 6).

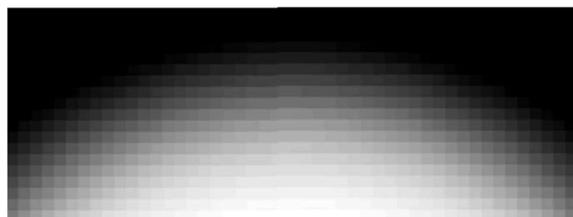
В отличие от съёма данных с экспериментальной керрограммы математическое моделирование позволяет получить больше информации. Так, разность фаз  $\Delta\Phi/\pi$  между обыкновенным и необыкновенным лучами при расчётах определяется выражением

$$\frac{\Delta\Phi(x, z)}{\pi} = 2B \cdot \int_{\ell_1}^{\ell_2} E_{\perp}^2(y) dy$$

и позволяет по полю наблюдения, получив фазограмму (рис. 7).



**Рис. 6.** Визуализированный и обработанный фрагмент матрицы с рис. 5. Шаг по обеим осям 5 мкм. Радиус кривизны острия 300 мкм. Размер керрограммы  $z \times x = 120 \times 175$  мкм

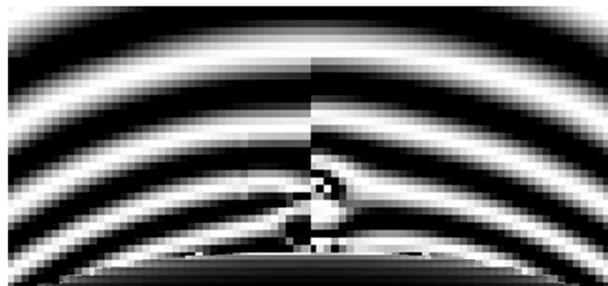


**Рис. 7.** Фазограмма, соответствующая керрограмме с рис. 6. Здесь чёрный цвет соответствует минимальному значению  $\Delta\Phi/\pi$ , а белый – максимальному

### 3. Микропузырки

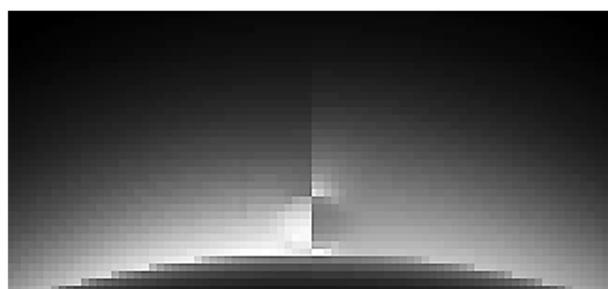
Разработанный метод моделирования позволяет оценить влияние на картину учёта микропузырьков. Увеличение пространственной дискретизации (до долей микрона) позволяет более детально рассмотреть процессы в приэлектродной области. В частности, если непосредственно у электрода расположить воздушный пузырёк диаметром 20 мкм, то визуализация картины полос Керра для этого пузырька до и после его ионизации позволяет чётко увидеть изменения, возникающие в приэлектродной зоне (рис. 8).

Построенное распределение поля разности фаз для обоих случаев позволяет не только более точно очертить контуры этих пузырьков (рис. 9), но и получить количественные значения для  $\Delta\Phi/\pi$  (рис. 10).



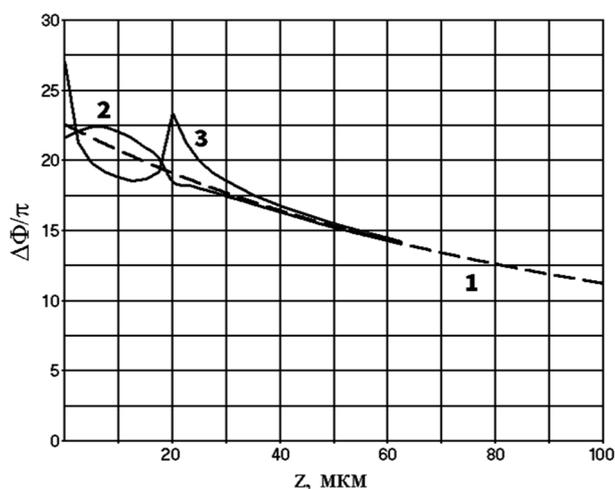
Воздушный пузырёк      Ионизированный пузырёк

**Рис. 8.** Керрограммы. Напряжение 120 кВ, радиус острия 300 мкм. Пространственное разрешение 2,5 мкм [13]



Воздушный пузырёк      Ионизированный пузырёк

**Рис. 9.** Фазограммы (белый – максимум). Напряжение 120 кВ, радиус острия 300 мкм. Пространственное разрешение 2,5 мкм [13]



**Рис. 10.** Изменение разности фаз  $\Delta\Phi/\pi$  по оси симметрии: 1 – невозмущённый промежуток; 2 – воздушный пузырёк; 3 – ионизированный пузырёк [13]

Анализ полученных керрограмм и фазограмм показал, что в данном случае возмущения, вносимые ионизацией пузырька диаметром 20 мкм, полностью исчезают

уже на расстоянии 65 мкм от острия. Без компьютерного моделирования такую информацию с экспериментальной керрограммы получить очень нелегко, а то и невозможно.

#### 4. Объёмный заряд

На предпробивной стадии нередко появляется объёмный заряд, локализованный около электрода. Для изучения таких ситуаций были выполнены расчёты с объёмным зарядом, обволакивающим остриё с радиусом 300 мкм слоем толщиной 100 мкм. Для экспериментальной керрограммы (рис. 11) после выполнения расчётов с набором значений объёмной плотности заряда была определена величина этого заряда.

С учётом неидеальности поверхности реального острия вид расчётной керрограммы и полученное значение объёмной плотности заряда  $240 \text{ Кл/м}^3$  дали хорошее совпадение с имеющимися оценками.

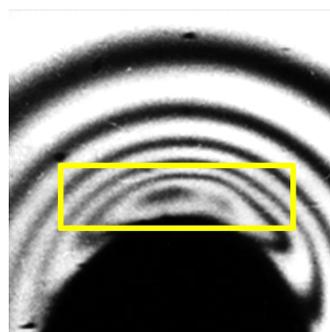


Рис. 11. Экспериментальная керрограмма с анализируемым фрагментом [9, 14]

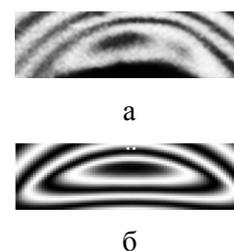
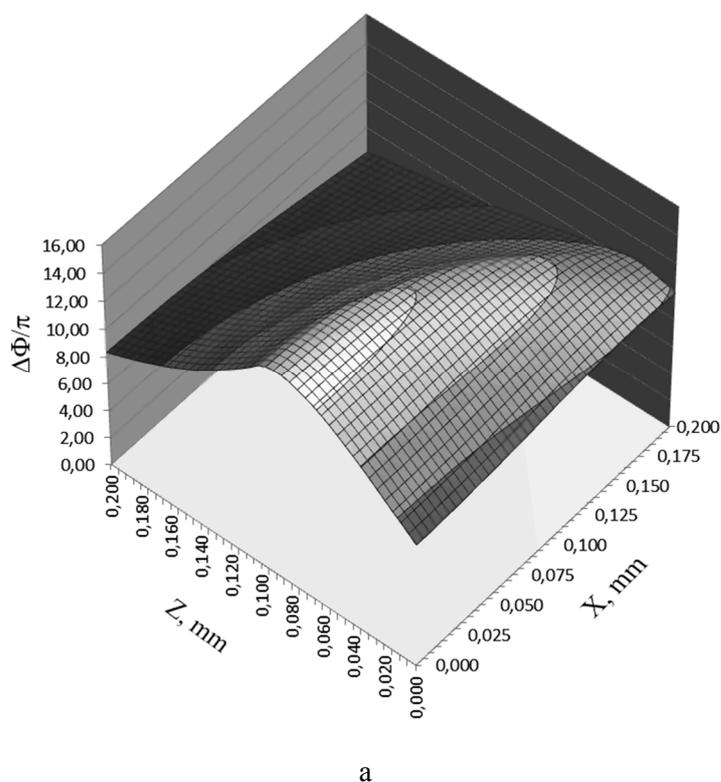


Рис. 12. Сравнение фрагментов экспериментальной (а) и расчётной (б) керрограмм [14]

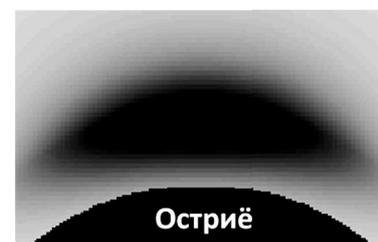
Данный метод моделирования и расшифровки экспериментальных керрограмм позволяет получить информацию, которая недоступна при обычных технологиях расшифровки. Так, на рис. 13 показана трёхмерная картинка области с объёмным зарядом, а также рассчитанные фазограмма и керрограмма, соответствующие модели экспериментальной керрограммы с рис. 11.



а



Керрограмма [13]



Фазограмма  
(чёрный – максимум  $\Delta\Phi/\pi$ )

б

Рис. 13. Расчётное пространственное распределение влияния объёмного заряда у острия на разность фаз  $\Delta\Phi/\pi$  между обыкновенным и необыкновенным лучами (а); керрограмма и фазограмма (б);

$$U = 120 \text{ кВ}, \rho = 240 \text{ Кл/м}^3$$

### Выводы

В результате применения описанной методики моделирования при расшифровке экспериментальных керрограмм получается гораздо больший объём не только качественной, но и количественной информации. Если в распоряжении имеется осциллограмма напряжения, то можно построить кинограмму (набор статичных картинок) протекавшего процесса. При необходимости из покадровой серии керрограмм можно смоделировать и хронограмму, даже если она и не регистрировалась. Если же в распоряжении имеется экспериментальная хронограмма, то её детальная расшифровка описанным методом позволит выявить нюансы, которые ускользают при обычном анализе.

Данная методика даёт возможность построить поле напряжений  $U$ , поля напряжённости электрического поля  $E$  и его про-

екции  $E_{\perp}$  на ось симметрии измерительной ячейки, а также поле разности фаз  $\Delta\Phi/\pi$ .

Получаемые в результате данные позволяют оценить и те характеристики, которые или нельзя, или очень трудно получить с реальной керрограммы, например распределение давления в приэлектродной зоне. Единственное условие применимости описанной методики – это наличие полной информации об условиях, в которых была получена экспериментальная керрограмма.

Описанный способ моделирования-расшифровки будет способствовать лучшему пониманию предпробивных процессов в жидкой изоляции высоковольтных энергоустановок, что приведёт к увеличению межремонтного периода и повышению надёжности используемой на энергообъектах высоковольтной техники.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Стекольников И.С.** Исследование разрядных явлений в жидкостях / И.С. Стекольников, В.Я. Ушаков // ЖТФ. 1965. Т. 35. № 9. С. 1692-1700.
2. **Ушаков В.Я.** Импульсный электрический пробой жидкостей / В.Я. Ушаков // Томск: Изд-во ТГУ, 1975. 258 с.
3. **Овчинников И.Т.** Исследование распределения электрических полей в воде с помощью эффекта Керра / И.Т. Овчинников, К.В. Яншин, Э.В. Яншин // ЖТФ. 1974. Т. 44. № 2. С. 472-474; Экспериментальные исследования импульсных электрических полей в воде вблизи острейного электрода с помощью эффекта Керра // ЖТФ. 1978. Т. 48. № 2. С. 2596-2598.
4. **Ushakov V.Y.** Impulse Breakdown of Liquids / V.Y. Ushakov, V.F. Klimkin, S.M. Korobeynikov; 1 ed. Power Systems, ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2007.
5. **Коробейников С.М.** Исследование предпробивных полей в нитробензоле с помощью эффекта Керра / С.М. Коробейников, К.В. Яншин, Э.В. Яншин // Физика диэлектриков и новые области их применения: тезисы. Всесоюз. конф. Караганда, 10-12 июня 1978 г. Сер. 2. С. 18-19.
6. **Кучинский Г.С.** Регистрация электрических полей в жидких диэлектриках на интерферометре Маха-Цандера с помощью эффекта Керра / Г.С. Кучинский, Е.А. Морозов // ЖТФ. 1983. Т. 53. № 6. С. 1215-1220.
7. **Кучинский Г.С.** Исследование физических явлений в воде в предразрядных электрических полях / Г.С. Кучинский, Е.А. Морозов // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. № 24. С. 1526-1531.
8. **Овчинников И.Т.** Экспериментальные исследования импульсных электрических полей в воде вблизи острейного электрода с помощью эффекта Керра / И.Т. Овчинников, К.В. Яншин, Э.В. Яншин // ЖТФ. 1978. Т. 48. № 2. С. 2596-2598.
9. Отчёт о научно-исследовательской работе «Исследование механизма импульсного электрического пробоя полярных жидких диэлектриков». Тема: «Исследование способов увеличения удельной запасённой энергии в высоковольтных импульсных накопителях энергии термоядерных установок». Государственный регистраци-

онный номер 78074914. СибНИИЭ, Новосибирск, 1980.

10. **Aben H.K.** Kerr effect tomography for general axisymmetric field / H.K. Aben // Applied Optics. 1987. № 26(14), 2921. doi:10.1364/ao.26.002921.

11. **Üstündağ A.** Kerr Electro-Optic Theory and Measurements of Electric Fields with Magnitude and Direction Varying Along the Light Path / A. Üstündağ, T.J. Gung, M. Zahn // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. June 1998. Vol. 5. № 3. P. 421-442.

12. **Üstündağ A.** Comparative Study of Theoretical Kerr Electromagnetic Fringe Pat-

terns in Two Dimensional and Axisymmetric Electrode Geometries / A. Üstündağ, M. Zahn // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. March 2001. Vol. 8. № 1. P. 15-26.

13. Study of partial discharges in liquids / S.M. Korobeynikov, A.G. Ovsyannikov, A.V. Ridel et al. // Journal of Electrostatics. 2020. 103, 103412. doi:10.1016/j.elstat.2019.103412.

14. **Korobeynikov S.M.** Simulation of electrooptical experiments in liquids / S.M. Korobeynikov, Yu.A. Kuznetsova, V.B. Yassinskiy // Journal of Electrostatics. 2020. 106, 103452. doi:10.1016/j.elstat.2020.103452.

**Кузнецова Юлия Александровна** – магистр естественных наук, старший преподаватель кафедры «Физика» Карагандинского технического университета

**Ясинский Владимир Борисович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика» Карагандинского технического университета

**Коробейников Сергей Миронович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Безопасность труда» Новосибирского государственного технического университета

**Yulia A. Kuznetsova** – Master of Science, Senior Lecturer, Department of Physics, Karaganda Technical University

**Vladimir B. Yassinskiy** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Physics, Karaganda Technical University

**Sergey M. Korobeynikov** – Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Head: Industrial Safety Department, Novosibirsk State Technical University

*Статья поступила в редакцию 07.09.21, принята к опубликованию 20.09.21*

УДК 537.311+537.612+620.178.6

## СИЛОВОЕ МЕХАНИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСОВ НА ПРОВОДНИК

О.Б. Скворцов, В.И. Сташенко, О.А. Троицкий

## MECHANICAL EFFECTS OF ELECTRICAL IMPULSES ON THE CONDUCTOR

O.B. Skvortsov, V.I. Stashenko, O.A. Troitsky

*Экспериментально установлено, что наибольшее силовое механическое действие электрический импульс оказывает в моменты его начала и окончания. Начальный и конечный моменты характеризуются созданием неравновесного распределения электрических полей как внутри, так и вне металлического проводника. Эти быстропротекающие процессы заканчиваются к моменту начала увеличения тока в проводнике и проявления скин-эффекта. В моменты начала и окончания внешнего электрического импульса возникают ударные механические напряжения в материале проводника. Динамические деформации происходят как вдоль оси проводника, так и в поперечном к этой оси направлении и зависят не только от величины, но и от полярности приложенного электрического импульса. Затем в материале проводника наблюдаются затухающие механические колебания, которые характеризуются частотами, существенно более низкими, чем частоты собственных электромагнитных колебаний в проводнике.*

Ключевые слова: импульс тока, вибрация, механические напряжения, деформации, пинч-эффект, скин-эффект

### Введение

Действие электрического импульса на проводник обусловлено влиянием электрического и магнитного полей как вокруг него, так и внутри, приводя в основном к тепловому и механическому действиям тока.

*It has been experimentally established that the maximum mechanical effect of an electric impulse is exerted at its start and end points. The initial and final moments are characterized by a nonequilibrium distribution of electric fields both inside and outside the metal conductor. These fast flowing processes are completed by the moment when the current in the conductor increases and the skin effect occurs. At the start and completion of an external electric impulse, shock mechanical stresses occur in the conductor material. Dynamic deformations occur both along and transverse to the axis of the conductor, which depends not only on the magnitude, but also on the polarity of the applied electric impulse. Therefore, damped mechanical oscillations are observed in the conductor material, which are characterized by the frequencies significantly lower than the frequencies of natural electromagnetic oscillations in the conductor.*

Keywords: current impulse, oscillation, mechanical stress, deformation, pinch effect, skin effect

Тепловое действие электрического тока является одним из наиболее известных эффектов взаимодействия электричества с металлом. Незначительное выделение тепла от кратковременного одиночного импульса тока, по проведенным оценкам, не влияет

на механический отклик материала проводника [1, 2].

Подключение источника внешнего электрического напряжения к проводнику создает в нем электрическое поле, которое быстро увеличивается. Меняющееся электрическое поле в соответствии с уравнениями Максвелла вызывает появление переменного магнитного поля, которое в проводнике создает электродвижущую силу (ЭДС) самоиндукции. Максимальная величина ЭДС, наблюдается в центре проводника, а минимальная величина на его поверхности. Вихревое электрическое поле самоиндукции, компенсируя приложенное внешнее электрическое поле, приводит к скин-эффекту – к неравномерности в распределении магнитного поля и плотности тока по сечению проводника. Действие скин-эффекта ограничено временем изменения электрических и магнитных полей на фронтах импульса тока. Таким образом, как ток, так и магнитное поле сначала сконцентрированы в поверхностном слое проводника [1, 2].

До настоящего времени механизмы преобразования энергии внешнего электрического импульса в процессы механической деформации полностью не изучены, хотя было предложено ряд гипотез, касающихся физики происходящих процессов. В зависимости от диапазона амплитуд внешних электрических воздействий возможно доминирование того или иного механизма и результата его проявления, вплоть до электрического взрыва проводника [3]. Анализ [1] публикаций по данному вопросу показывает, что в большинстве случаев авторы предполагают наличие некоторого одного доминирующего механизма формирования механического действия электрического тока в виде динамического теплового действия, пинч-эффекта, динамического скин-эффекта, действия электронного ветра, магнитогидродинамического процесса и т.п. При этом рассматривается квазистатическое состояние. Экспериментальное наблюдение временных процессов в проводнике позволяет предположить, что в действительности наблюдается ряд по-

следовательных процессов на большей части действия электрического импульса, а взаимная связь между электрическими процессами и механическим откликом отсутствует или малозаметна.

Силовые действия электрического импульса на проводник, ведет к динамическим напряжениям в нем [4]. Механическое действие электрического импульса на проводник, например, может считаться результатом действия тепловых деформаций или пинч-эффекта [4, 5].

Легко установить, что прохождение импульсов тока высокой плотности по проводнику сопровождается звуковыми ударами. Сила ударов и их частота определяются амплитудой и частотой тока. Механические ударные процессы связаны с преобразованием энергии приложенного электрического импульса в энергию упругих или пластических деформаций проводника.

Такие процессы можно экспериментально фиксировать по сигналам миниатюрных датчиков вибрации, установленных на проводнике. Важным является то, что динамические механические напряжения, связанные как с ударными импульсными, так и с затухающими релаксационными колебаниями, могут быть практически использованы для неразрушающего контроля [6, 7]. Они также должны учитываться как факторы, влияющие на процессы циклической усталости в материале электропроводящих элементов и при использовании для их изоляции диэлектрических материалов. Динамические механические напряжения оказывают заметное влияние на пластические свойства материалов в процессе их обработки при электропластическом эффекте [1]. Их действие обеспечивает улучшение свойств сварных соединений в процессах электроимпульсной сварки [6, 7], что обусловлено значительной величиной возникающих при этом ускорений (часто достигающих десятков  $g$ ) и сравнительно высокими частотами (единицы и десятки килогерц).

Целью работы было изучение силового механического действия на проводник однократных электрических импульсов и импульсов чередующейся полярности.

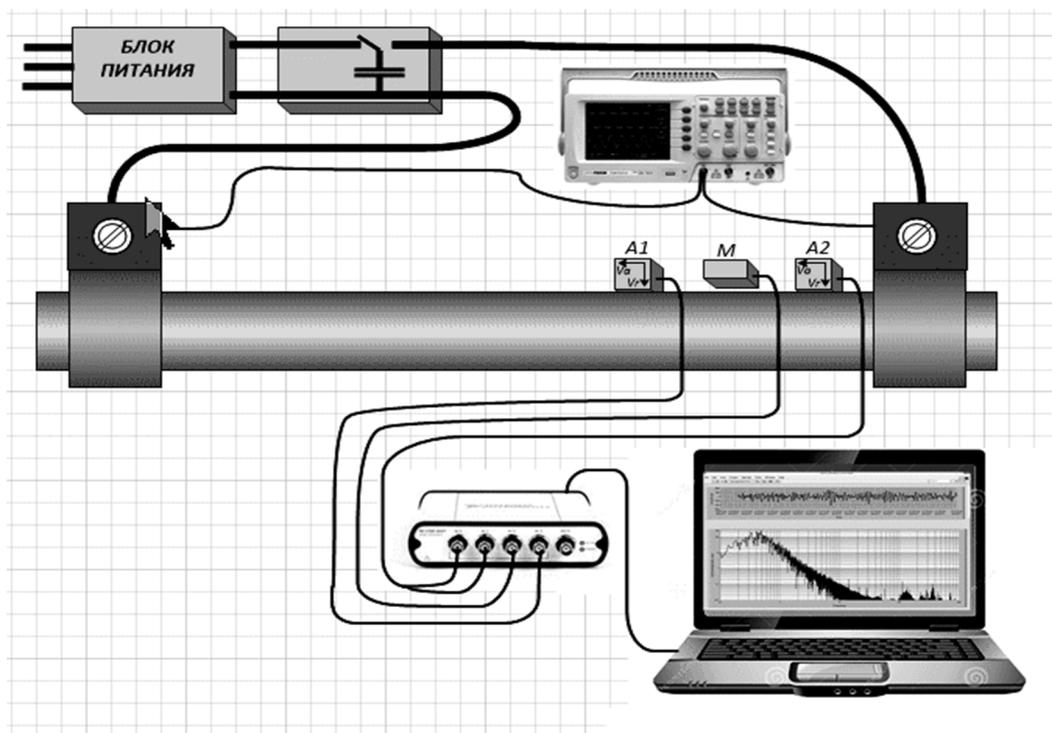
**Методика измерений**

На одиночный проводник от генератора тока подавался электрический импульс или серия импульсов противоположной полярности. Вибрационный отклик определялся трехкомпонентным акселерометром типа АП20, закрепленным на проводнике через ситалловую прокладку, исключающую электрический контакт. Величина тока через проводник контролировалась бесконтактным датчиком магнитного поля.

Стенд для проведения испытаний показан на рис. 1. Сигналы от датчиков вибрации и датчика Холла магнитного поля синхронно собираются USB модулем сбора данных NI 4431 для записи и последующей обработки на компьютере [8]. Частота дискретизации по всем каналам сбора данных превышала 100 КГц, что позволяло полу-

чать временное разрешение не хуже 10 микросекунд.

По полученным данным производилась оценка амплитуд и временных характеристик (длительность фронтов, период и частота колебаний) всех сигналов. Использование интегрирования позволило получить данные величин вибрационной скорости и вибрационного перемещения. При этом оценка отклика по вибрационному ускорению представлялась наиболее информативной, поскольку действующие ускорения пропорциональны локальным действующим динамическим силам, а следовательно, и механическим динамическим нагрузениям. При этом сигналы ускорения позволяли анализировать быстропротекающие динамические изменения в проводнике.



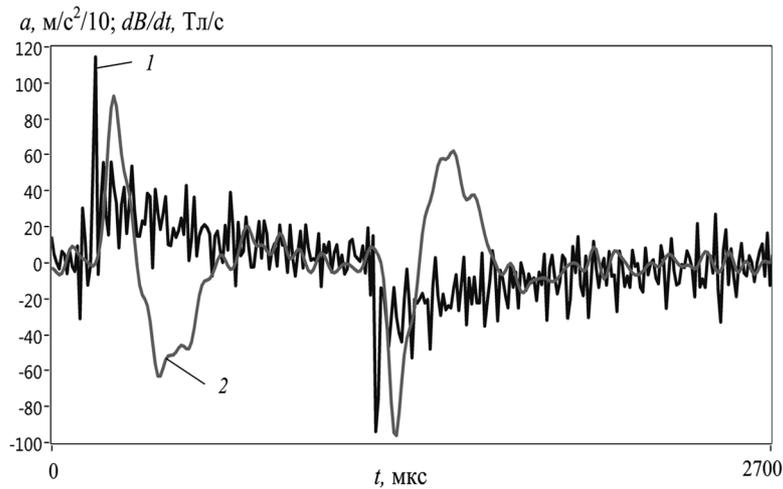
**Рис. 1.** Структура стенда для измерения индукции магнитного поля датчиком М и вибрации проводника А1 и А2

**Экспериментальные результаты**

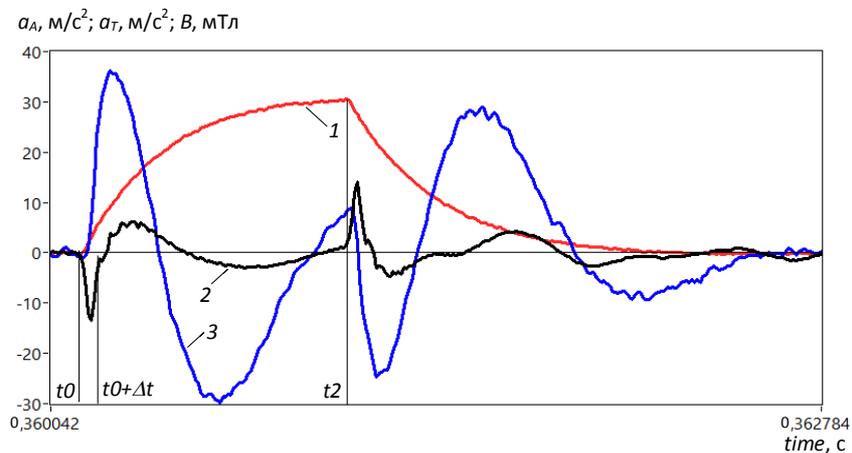
**Действие одиночного электрического импульса на проводник.** Воздействие одиночного импульса тока амплитудой до 1000 А и длительностью менее одной миллисекунды приводит к появлению на фронте и спаде импульса скачка вибрационного

отклика. На рис. 2-6 приведены записи сигналов для проводников из меди, стали, титана и серебра.

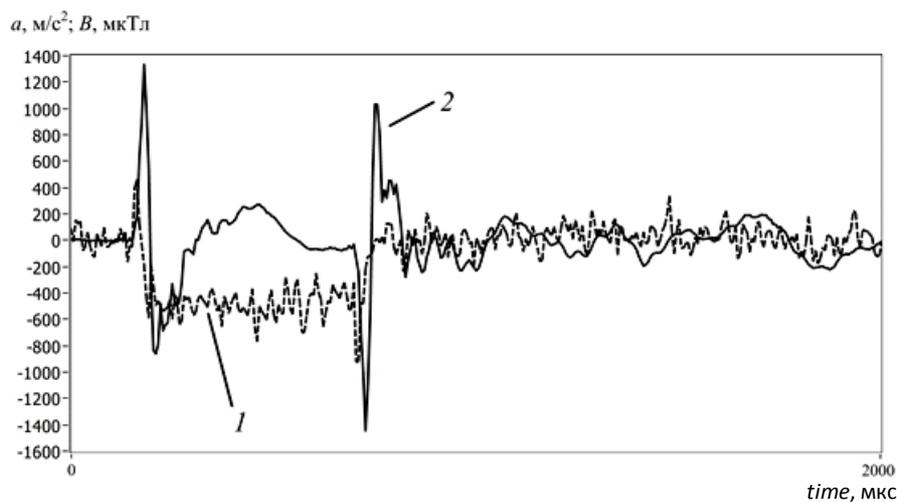
На рис. 4 приведены зависимости радиальной составляющей вибрационных сигналов и кольцевой компоненты магнитного поля вокруг образца из стали.



**Рис. 2.** Медный образец диаметром 3 мм, длиной 150 мм. Производная магнитного потока (1) и ускорение радиальной вибрации (2) при воздействии импульса тока амплитудой 1000 А, длительностью 1006 мкс



**Рис. 3.** Запись сигнала от датчика магнитной индукции (1), а также сигналов осевой (2) и поперечной (3) компонент вибрационного ускорения. Проводник из меди. Диаметр проводника 2 мм, длина проводника 150 мм



**Рис. 4.** Временные зависимости сигналов от датчиков магнитной индукции (1) и вибрации (2) для образца из стали диаметром 3 мм и длиной 150 мм

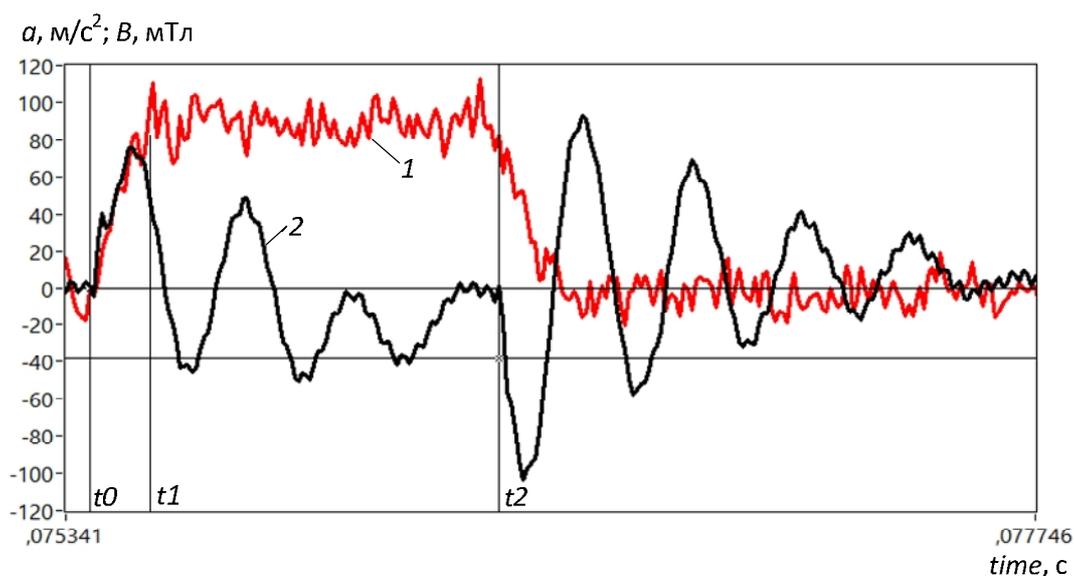
Полученные данные для меди, серебра, а также золота, алюминия свидетельствуют и о том, что у ферромагнетиков, например стали, где скин-эффект проявляется значительно сильнее, скачок вибрации значительно сильнее.

Синхронный контроль магнитного поля и контроль осевых и поперечных составляющих вибрации дали возможность установить, что в возбуждении колебаний образца существенен кратковременный быстрый рост и быстрый спада механического силового импульса, который представляет собой затухающий колебательный процесс. Именно «короткая» часть переднего и заднего фронтов электрического импульса оказывает значительное воздействие на проводник. Намного меньше и слабее влияет на вибрации основная часть электрического импульса.

Эксперименты, выполненные на титановых образцах, показали незначительный уровень вибрации (рис. 5). Низкий уровень вибрации фиксировался на относительно тонких образцах из титана, для которых скин-эффект проявляется слабо. Внешний электрический импульс начинается в момент  $t_0$  и заканчивается в момент  $t_2$ . Время нарастания тока через провод-

ник  $t_0 - t_1$  определяет длительность переднего фронта.

Согласно экспериментальным данным, можно отметить следующие особенности: вибрационный отклик имеет максимальную амплитуду в моменты, соответствующие началу переднего и заднего фронтов. Максимальным значениям амплитуды вибрационного отклика соответствуют значения тока через проводник, близкие к нулевым. Формы отклика от воздействия начала переднего фронта и начала заднего фронта одинаковы, а их знаки противоположны. Полярность вибрационного отклика, как в продольном, так и в поперечном направлении зависит от полярности внешнего приложенного электрического импульса. Во время действия переднего и заднего фронтов и скин-эффекта, а также во время действия плоской вершины электрического импульса, которому соответствует максимальное по величине тепловое действие тока и пинч-эффект, вибрация носит характер затухающих гармонических колебаний и не зависит от изменений тока в проводнике. Зависимость амплитуды вибрационного отклика от амплитуды электрического импульса близка к линейной.



**Рис. 5.** Действие электрического импульса длительностью от  $t_0$  до  $t_2 - 2000$  мкс на проводник из титана. Диаметр проводника 2 мм, длина проводника 150 мм. Магнитная индукция (1) и поперечное вибрационное ускорение (2)

Такие особенности позволяют предположить, что возбуждение упругой деформации в проводнике при приложении электрического импульса происходит в виде процесса сходного с механическим ударом в моменты начала переднего и заднего фронтов электрического импульса, т. е. в моменты изменения внешнего электрического поля, вызывающего поляризацию проводника при практически полном отсутствии электрического тока в проводнике. Дальнейшее увеличение тока через проводник и процессы релаксации возникших упругих деформаций в проводнике протекают во времени параллельно, не вызывая заметного взаимного влияния.

Перечисленная последовательность процессов взаимодействия внешнего электрического импульса и механического отклика в проводнике представляется доминирующей. Другие механизмы также могут присутствовать, но их влияние оказывается незначительным. Например, тепловое действие тока или пинч-эффект должны проявляться как независимые от полярности и иметь квадратичную зависимость от амплитуды внешнего электрического воздействия. Тепловой эффект направлен на расширение, а пинч-эффект – на сжатие материала проводника в поперечном направлении, но экспериментально наблюдаются изгибные формы колебаний проводника в поперечном направлении. Следует также принять во внимание, что квадратичная зависимость для таких эффектов может привести к существенному росту их вклада в механический отклик с ростом плотности тока через проводник.

**Действие серии импульсов чередующейся полярности на проводник.** К металлическому образцу были приложены электрические импульсы с чередующейся полярностью и одинаковой амплитудой. Серия импульсов тока

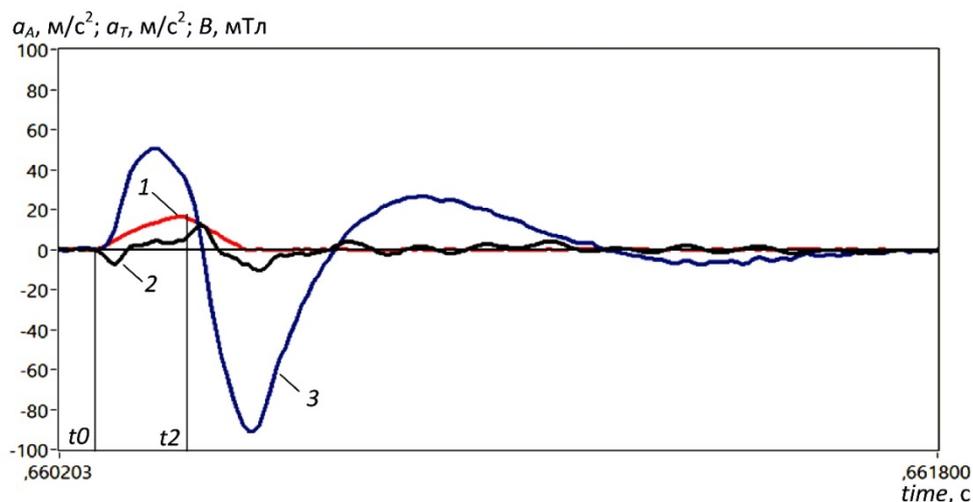
вызывала нагревание образца не более чем на  $80-100^{\circ}\text{C}$ .

Для пары импульсов противоположных полярностей результаты представлены на рис. 6. В момент начала переднего и заднего фронтов электрического импульса полярность вибрационного отклика меняется противоположно. Полярность вибрационного отклика также меняется при смене направления приложенного электрического импульса, как это показывают сигналы на рис. 6.

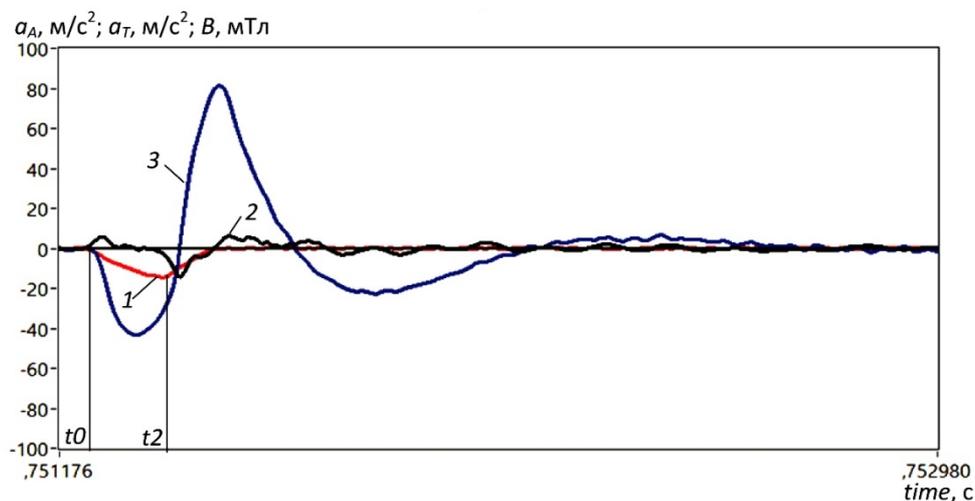
Для серии электрических импульсов чередующейся полярности была выполнена запись сигналов поперечной и осевой составляющих ускорения [9] (рис. 7).

Полученные результаты указывают на линейный характер зависимостей для электрических импульсов разной (пунктирная и сплошная линии) полярности. Изменение полярности электрического импульса, приводит к изменению знака генерируемого вибрационного процесса, показывая, что возникающие действующие динамические силы как осевого, так и поперечного направления меняют знак в зависимости от полярности приложенного электрического импульса. В условиях воздействия сравнительно малых токов (средняя плотность тока порядка  $300\text{ А/мм}^2$ ) наблюдаются значительные амплитудой в десятки микрон. Похожие по характеру результаты для динамических сил, соответствующие перегрузкам до  $10\text{ g}$  и перемещениям поверхности различных материалов (медь, сталь, серебро, золото), были получены ранее в первой постановке опытов при действии одиночных электрических импульсов.

Различия результатов носят лишь количественный, а не качественный характер, что свидетельствует об общей природе происходящих процессов преобразования, части энергии электрического импульса в деформацию металлического образца.

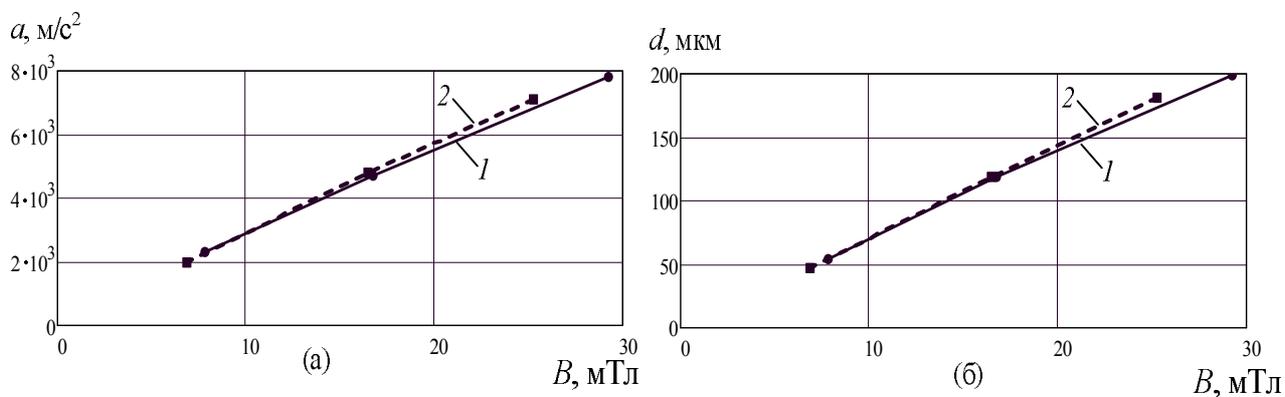


а



б

**Рис. 6.** Запись сигнала от датчика магнитной индукции (1), а также сигналов осевой  $a_A$  (2) и поперечной  $a_T$  (3) компонент вибрационного ускорения. Случай прямой (а) и обратной (б) полярностей внешнего электрического импульса. Проводник из серебра. Диаметр проводника 2 мм, длина проводника 150 мм



**Рис. 7.** Зависимости размаха ускорения (а) и перемещения (б) от размаха магнитной индукции (амплитуды тока) при прямом (1) и обратном (2) направлении приложенного электрического импульса

**Заключение.** Динамические процессы появления, увеличения и перераспределения тока в проводнике, которые могут оказывать влияние на механические процессы в проводнике [10], как показывает анализ имеющихся экспериментальных результатов, имеют существенное запаздывание по отношению к моментам изменения внешнего электрического поля. Такие эффекты должны проявляться как не зависящие от полярности внешнего электрического импульса. Эффект действия тока, увеличивающегося после начала внешнего электрического импульса, на поверхностные слои металла может оказаться важным дополнительным механизмом деформации, но для случая действия электрических импульсов, вызывающих упругие деформации металла, механизм формирования ударных механических напряжений в моменты, в которые изменения внешнего поля поляризации материала проводника оказывается явно доминирующим. Действие неполярных сил, связанных с последующим появлением тока высокой плотности, у поверхности проводника может быть значительным, но оно не оказывает заметного влияния на процесс релаксации возникших ударных напряжений в моменты быстрого изменения электрического поля. В эти моменты происходит ускоренное на переднем фронте и замедленное движение заряженных частиц в материале проводника, которое сопровождается формированием продольных и поперечных волновых процессов [11]. Импульсный характер изменения во времени уровня механических напряжений под действием электрических импульсов при

этом подобен воздействию ультразвука на деформацию металла [12].

### Выводы

1) «ударный» вибрационный импульс формируется в начальный момент фронта электрического импульса, предшествуя скин-эффекту; 2) механические процессы, вызванные электрическим импульсом, имеют многоступенчатый характер и состоят из возбуждения ударного механического отклика, после которых в проводнике наблюдаются затухающие колебания; 3) установлена линейная и знаковая зависимость механических напряжений и деформаций от амплитуды и направления внешнего электрического импульса; 4) экспериментально установленные закономерности не вызваны скин-, пинч-, пондеромоторным или тепловым эффектами и являются независимым эффектом действия внешнего электрического импульса на различные металлы; 5) при более высоких уровнях электрического воздействия, сопровождаемых пластическими деформациями, вклад пинч-эффекта, теплового эффекта и т. д. может стать более заметным, поскольку определяющие их силы пропорциональны квадрату амплитуды электрического воздействия; 6) разработанная методика проведения экспериментов позволяет снизить влияние на результаты опытов множества различных процессов, происходящих в материалах при различных внешних условиях, и показывает наличие общего механизма формирования механического действия электрических импульсов на проводник.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Воздействия импульсами тока и СВЧ-излучением на конструкционные материалы. Электродинамические и электрохимические эффекты в проводниках / О.А. Троицкий, В.И. Сташенко, В.С. Савенко и др. М.: Изд-во «Ким Л.А.», 2019. 278 с.

2. Скворцов О.Б. Динамические эффекты в проводниках при воздействии импульсных токов / О.Б. Скворцов,

В.И. Сташенко, О.А. Троицкий // Вестник Сибирского государственного промышленного университета. 2020. № 1 (31). С. 27-34.

3. Бакларь В.Ю. Математическая модель процесса электровзрыва цилиндрических проводников / В.Ю. Бакларь, Н.И. Кускова, Д.И. Челпанов // Вісник НТУ «ХП». 2015. № 51 (1160). С. 3-7.

4. **Батаронов И.Л.** Механизмы электропластичности / И.Л. Батаронов // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 10. С. 93.

5. **Батаронов И.Л.** Электропластическая деформация металлов и динамический пинч-эффект / И.Л. Батаронов, А.М. Рощупкин // Известия вузов. Черная металлургия. 1993. № 8. С. 57-61.

6. **Лашенко Г.И.** Технологические возможности вибрационной обработки сварных конструкций (Обзор) / Г.И. Лашенко // Автоматическая сварка. 2016. № 7 (754). С. 28-34.

7. **Ленк А.** Механические испытания приборов и аппаратов / А. Ленк, Ю. Ренитц. М.: Мир, 1976. 272 с.

8. **Скворцов О.Б.** Контроль вибрации с применением аппаратуры National Instruments / О.Б. Скворцов // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments 2013: сб. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф. «NIDays» компа-

нии National Instruments. М.: ДМК, 2013. С. 78-80.

9. **Troitskii O.A.** Measurements of vibrations produced by current pulses in elements of electrical equipment / O.A. Troitskii, O.B. Skvortsov, V.I. Stashenko // Russian electrical engineering. 2018. Vol. 89. № 3. P. 143.

10. Analysis of the Relationships for the Vibrational Response to the Excitation of Vibroacoustic Processes in Conductors from the Action of a Pulsed Current / O.A. Troitskij, O.B. Skvortsov, E.A. Pravotorova, V.I. Stashenko // KnE Materials Science. [S. l]. May 2018. P. 611.

11. **Парселл Э.** Электричество и магнетизм. Берклевский курс физики / Э. Парселл. СПб.: Лань, 2005. Т. 2. 444 с.

12. **Каганов М.И.** Трансформация электромагнитной энергии в звуковую электронами металла (теория) / М.И. Каганов, В.Б. Фикс // Успехи физических наук. 1986. Т. 150. № 9. С. 159.

**Скворцов Олег Борисович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, начальник отдела НТЦ «Завод балансировочных машин»

**Сташенко Владимир Иванович** – кандидат физико-математических наук Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва

**Троицкий Олег Александрович** – доктор технических наук, профессор, член АЭН РФ, академик АЭН РФ Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва

**Oleg B. Skvortsov** – PhD (Technical Sciences), Senior Researcher of Mechanical Engineering Research Institute of the RAS, Moscow, Head: Division of Scientific and Technical Center for Balancing Machines Plant

**Vladimir I. Stashenko** – PhD (Physics and Mathematics), Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

**Oleg A. Troitsky** – Dr Sc. (Tech.), Professor, Member of the AEN of the Russian Federation, Academician of the AEN of the Russian Federation, Mechanical Engineering Research Institute of the RAS, Moscow

*Статья поступила в редакцию 01.07.21, принята к опубликованию 12.08.21*

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313.333:621.3.078

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ  
С ФАЗНЫМ РОТОРОМ В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ d-q

В.И. Доманов, Д.Г. Мурзаков, Д.С. Халиуллов

MATHEMATICAL MODEL OF AN INDUCTION MOTOR  
WITH A WOUND ROTOR IN THE d-q COORDINATE SYSTEM

V.I. Domanov, D.G. Murzakov, D.S. Khaliullof

Рассмотрена схема замещения асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР). Составлена система дифференциальных уравнений АДФР с учетом режима удержания вала двигателя. Разработана структурная схема АДФР. Приведены графики переходных процессов электропривода в различных режимах. Проведен анализ работы двигателя при изменении напряжении ротора.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, транзисторный регулятор напряжения, ШИМ, дифференциальный сельсин, двойное питание

АДФР широко применяется в транспортном, грузоподъемном оборудовании и других областях [1]. Анализ и синтез таких систем с учетом современных методов исследования и перспективных режимов

The article considers a scheme for replacement of an induction motor with a wound rotor (WRIM). A system of differential equations for the WRIM is given with regard to the mode of holding the motor shaft. A block diagram of the WRIM has been developed. The graphs of transient processes of the electric drive in various modes are given. An analysis of the motor operation under changes in the rotor voltage is carried out.

Keywords: induction motor, transistorized voltage regulator, PWM, differential selsyn, dual power supply

является актуальным. В качестве модели для иллюстрации процессов, происходящих в двигателе, может быть использована Т-образная схема замещения [2, 3], представленная на рис. 1.

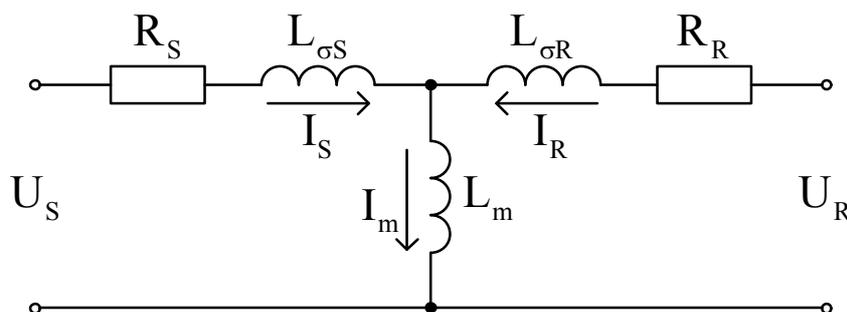


Рис. 1. Т-образная схема замещения АДФР

На схеме замещения:

$U_S$  – обобщенный вектор входного напряжения статора;

$U_R$  – обобщенный вектор входного напряжения ротора;

$I_S$  – обобщенный вектор тока статора;

$I_R$  – обобщенный вектор тока ротора;

$I_m$  – обобщенный вектор тока намагничивания.

Параметры схемы замещения:

$R_S$  – сопротивление статора характеризует активные потери в статорных обмотках и равно сопротивлению фазной обмотки статора;

$L_{\sigma S}$  – индуктивность рассеяния статора характеризует ту часть потока статора, которая не сцеплена с ротором и не принимает участие в создании момента;

$L_m$  – главная индуктивность характеризует ту часть потока, которая сцеплена со статором и с ротором и участвует в создании момента. На линейном участке кривой намагничивания двигателя главная индуктивность является величиной постоянной;

$L_{\sigma R}$  – индуктивность рассеяния ротора характеризует ту часть потока ротора, которая не сцеплена со статором и не принимает участие в создании момента;

$R_R$  – сопротивление ротора в режиме короткого замыкания (вал двигателя заторможен).

### Треугольник потокосцепления статора

Вектор потокосцепления статора вычисляется как сумма вектора потока намагничивания и потока рассеяния статора:

$$\vec{\Psi}_S = \vec{\Psi}_m + \vec{\Psi}_{\sigma S}.$$

Поток рассеяния статора равен произведению тока статора на индуктивность рассеяния статора ( $L_{\sigma S}$ ):

$$\vec{\Psi}_{\sigma S} = L_{\sigma S} \vec{I}_S.$$

### Треугольник потокосцепления ротора

Вектор потокосцепления ротора определяется алогично потокосцеплению статора:

$$\vec{\Psi}_R = \vec{\Psi}_m + \vec{\Psi}_{\sigma R}.$$

Поток рассеяния ротора равен произведению тока ротора на индуктивность рассеяния ротора ( $L_{\sigma R}$ ):

$$\vec{\Psi}_{\sigma R} = L_{\sigma R} \vec{I}_R.$$

### Связь между треугольником токов и треугольниками потоков

Поток намагничивания равен произведению тока намагничивания на индуктивность намагничивания двигателя ( $L_m$ ):

$$\vec{\Psi}_m = L_m \vec{I}_m.$$

С помощью вышеприведенных соотношений потокосцепления выражается через токи статора и ротора следующим образом:

$$\begin{cases} \vec{\Psi}_m = L_m \vec{I}_m = L_m \vec{I}_S + L_m \vec{I}_R \\ \vec{\Psi}_S = L_S \vec{I}_S + L_m \vec{I}_R \\ \vec{\Psi}_R = L_m \vec{I}_S + L_R \vec{I}_R \end{cases} \quad (1)$$

где  $L_S = L_m + L_{\sigma S}$  – индуктивность статора;

$L_R = L_m + L_{\sigma R}$  – индуктивность ротора.

Уравнение равновесия статорной обмотки [3]:

$$\vec{U}_S = \frac{d\vec{\Psi}_S}{dt} + \vec{I}_S R_S.$$

Надо заметить, что это уравнение описывает статор двигателя не абсолютно точно. Оно верно только для идеального двигателя, в котором магнитодвижущие силы идеально синусоидально распределены в воздушном зазоре между статором и ротором. Кроме того, оно никак не учитывает потерь на намагничивание двигателя. Но если пренебречь неидеальностями двигателя и потерями на намагничивание по сравнению с активными потерями, то данное уравнение можно считать верным [4].

В неподвижной системе координат  $\alpha\beta$ , связанной со статором, его можно переписать в следующем виде [5]:

$$\begin{cases} U_{S\alpha} = \frac{d\psi_{S\alpha}}{dt} + I_{S\alpha} R_S \\ U_{S\beta} = \frac{d\psi_{S\beta}}{dt} + I_{S\beta} R_S. \end{cases}$$

В случае если двигатель с фазным ротором и на него подается напряжение  $U_R$ , уравнение равновесия ротора во вращающейся системе координат  $\gamma\delta$ , связанной с ротором, выглядят следующим образом [5]:

$$\begin{cases} U_{R\gamma} = \frac{d\psi_{R\gamma}}{dt} + I_{R\gamma} R_R \\ U_{R\delta} = \frac{d\psi_{R\delta}}{dt} + I_{R\delta} R_R \end{cases}$$

Перейдем во вращающуюся систему координат  $dq$ , с ориентацией оси  $d$  по току ротора.

Для данной системы характерно следующее:

- вращается в пространстве со скоростью поля  $\omega_e$ ;
- проекция потока ротора на ось  $q$  равняется нулю ( $\psi_{Rq} = 0$ );
- скорость поля ( $\omega_e$ ) и скорость ротора ( $\omega_R$ ) связаны следующим соотношением:

$$\Delta\omega = \omega_e - Z_p \omega_R, \quad (2)$$

где  $\Delta\omega$  – скорость скольжения (скорость поля ротора);  $Z_p$  – число пар полюсов двигателя.

Учитывая эти свойства, представим уравнения равновесия статора и ротора в системе  $dq$ :

$$\begin{cases} U_{Sd} = \frac{d\psi_{Sd}}{dt} + I_{Sd} R_S - \omega_e \psi_{Sq} \\ U_{Sq} = \frac{d\psi_{Sq}}{dt} + I_{Sq} R_S + \omega_e \psi_{Sd}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} U_{Rd} = \frac{d\psi_{Rd}}{dt} + I_{Rd} R_R \\ U_{Rq} = \frac{d\psi_{Rq}}{dt} + I_{Rq} R_R + \Delta\omega \psi_{Rd}. \end{cases} \quad (4)$$

Момент АД создается силой Лоренца. Если рассматривать электромагнитный момент АД как результат взаимодействия векторов тока и потокосцепления статора, то

$$\begin{cases} U_{Sd} = p((L_S - L_m K_R) I_{Sd} + K_R \psi_R) + I_{Sd} R_S - \omega_e ((L_S - L_m K_R) I_{Sq}) \\ U_{Sq} = p((L_S - L_m K_R) I_{Sq}) + I_{Sq} R_S + \omega_e ((L_S - L_m K_R) I_{Sd} + K_R \psi_R). \end{cases} \quad (9)$$

формула для вычисления момента выглядит так:

$$M_{em} = \frac{3}{2} Z_p (I_{Sq} \psi_{Sd} - I_{Sd} \psi_{Sq}). \quad (5)$$

Модель АД (без учета насыщения) будем строить в системе  $dq$ , ориентированной по потоку ротора. Из третьего уравнения системы (4) выразим ток ротора:

$$\vec{I}_R = \frac{1}{L_R} \vec{\psi}_R - \frac{L_m}{L_R} \vec{I}_S. \quad (6)$$

Запишем соотношение (6) в проекциях на оси  $dq$ :

$$\begin{cases} I_{Rd} = \frac{1}{L_R} \psi_R - \frac{L_m}{L_R} I_{Sd} \\ I_{Rq} = -\frac{L_m}{L_R} I_{Sq}. \end{cases} \quad (7)$$

Подставив ток ротора из уравнения (6) во второе уравнение системы, получим

$$\begin{aligned} \vec{\psi}_S &= L_S \vec{I}_S + L_m \vec{I}_R = \\ &= L_S \vec{I}_S + L_m \left( \frac{1}{L_R} \vec{\psi}_R - \frac{L_m}{L_R} \vec{I}_S \right) = \\ &= L_S \vec{I}_S + \frac{L_m}{L_R} \vec{\psi}_R - \frac{L_m L_m}{L_R} \vec{I}_S = \\ &= (L_S - L_m K_R) \vec{I}_S + K_R \vec{\psi}_R, \end{aligned}$$

где  $K_R = \frac{L_m}{L_R}$ .

В проекциях на оси системы  $dq$  это соотношение выглядит так:

$$\begin{cases} \psi_{Sd} = (L_S - L_m K_R) I_{Sd} + K_R \psi_R \\ \psi_{Sq} = (L_S - L_m K_R) I_{Sq}. \end{cases} \quad (8)$$

Подставив в уравнения равновесия статора значения проекций потока статора из системы (8), получим соотношения:

Выразив токи статора, получим

$$\begin{cases} pI_{Sd} = \frac{1}{L_S - L_m K_R} (U_{Sd} - I_{Sd} R_S - K_R p\Psi_R) + \omega_e I_{Sq} \\ pI_{Sq} = \frac{1}{L_S - L_m K_R} (U_{Sq} - I_{Sq} R_S - K_R p\Psi_R) - \omega_e I_{Sq} \end{cases} \quad (10)$$

Система (10) описывает связь токов и напряжений статора при различных скоростях поля и потокосцеплениях ротора. Ее можно назвать моделью статора.

Для описания процессов ротора запишем совместно первое уравнение системы (4) и первое уравнение системы (7):

$$\begin{cases} U_{Rd} = \frac{d\Psi_R}{dt} + I_{Rd} R_R \\ I_{Rd} = \frac{1}{L_R} \Psi_R - \frac{L_m}{L_R} I_{Sd}. \end{cases}$$

Выразив  $p\Psi_R$  через  $\Psi_R$  и  $I_{Sd}$  из этих двух уравнений, получим

$$p\Psi_R = U_{Rd} + \frac{1}{T_R} (L_m I_{Sd} - \Psi_R). \quad (11)$$

Данное соотношение, описывающее поведение потокосцепления ротора в зависимости от тока статора, можно назвать моделью ротора.

В системе (10) остался один неопределенный параметр – скорость поля.

Сначала определим скольжение, решив совместно второе уравнение системы (4) и второе уравнение системы (7):

$$\begin{cases} pI_{Sd} = \frac{1}{L_S - L_m K_R} (U_{Sd} - I_{Sd} R_S - K_R p\Psi_R) + \omega_e I_{Sq} \\ pI_{Sq} = \frac{1}{L_S - L_m K_R} (U_{Sq} - I_{Sq} R_S - K_R p\Psi_R) - \omega_e I_{Sq} \\ p\Psi_R = U_{Rd} + \frac{1}{T_R} (L_m I_{Sd} - \Psi_R) \\ \omega_e = Z_p \omega_R + \frac{U_{Rq}}{\Psi_R} + \frac{L_m}{\Psi_R T_R} I_{Sq} \\ M_{em} = \frac{3 Z_p K_R}{2} \Psi_R I_{Sq} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \Delta\omega &= \frac{U_{Rq}}{\Psi_R} + \frac{L_m R_R}{\Psi_R L_R} I_{Sq} = \\ &= \frac{U_{Rq}}{\Psi_R} + \frac{K_R R_R}{\Psi_R} I_{Sq} = \frac{U_{Rq}}{\Psi_R} + \frac{L_m}{\Psi_R T_R} I_{Sq}. \end{aligned}$$

Используя полученное соотношение для  $\Delta\omega$ , скорость поля можно вычислить по формуле

$$\begin{aligned} \omega_e &= Z_p \omega_R + \Delta\omega = \\ &= Z_p \omega_R + \frac{U_{Rq}}{\Psi_R} + \frac{L_m}{\Psi_R T_R} I_{Sq}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для построения модели электромагнитных процессов АД не хватает уравнения для электромагнитного момента в системе  $dq$ .

Подставив в уравнение (5) выражения для составляющих потокосцепления статора из системы (8), получим

$$M_{em} = \frac{3 Z_p K_R}{2} \Psi_R I_{Sq}. \quad (13)$$

Сведем в единую систему уравнения (10)-(13) и получим описание модели электромагнитных процессов АД:

В режиме «Удержания» будет действовать статический синхронизирующий момент  $M_{syn}$  [6, 7]:

$$M_{syn} = M_{max} \sin \theta .$$

Статический синхронизирующий момент – это вращающий момент, действующий на вал неподвижного ротора ( $\omega = 0$ ) при угле поворота  $\theta$ .

В динамическом режиме в случае  $\omega = \text{const}$  или  $\omega = \text{var}$  будет действовать динамический момент синхронизации:

$$M_{syn.d} = M_{syn} \cos \frac{\omega}{4f} , \quad (15)$$

где  $\omega$  – угловая частота вращения ротора;  $f$  – частота сети.

Уравнение движения в таком случае примет вид

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{em} + M_{syn.d} - M_{st} . \quad (16)$$

Для описания работы АДФР в режиме «удержания» необходимо дополнить систему (14) уравнением динамического момента синхронизации (15) и уравнением движения (16):

$$\left\{ \begin{array}{l} pI_{Sd} = \frac{1}{L_S - L_m K_R} (U_{Sd} - I_{Sd} R_S - K_R p \Psi_R) + \omega_e I_{Sq} \\ pI_{Sq} = \frac{1}{L_S - L_m K_R} (U_{Sq} - I_{Sq} R_S - K_R p \Psi_R) - \omega_e I_{Sd} \\ p \Psi_R = U_{Rd} + \frac{1}{T_R} (L_m I_{Sd} - \Psi_R) \\ \omega_e = Z_p \omega_R + \frac{U_{Rq}}{\Psi_R} + \frac{L_m}{\Psi_R T_R} I_{Sq} \\ M_{em} = \frac{3 Z_p K_R}{2} \Psi_R I_{Sq} \\ M_{syn.d} = M_{max} \sin \theta \cos \frac{\omega}{4f} \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_{em} + M_{syn.d} - M_{st} \end{array} \right. \quad (17)$$

На основании системы уравнений (17) составим структурную схему АДФР (рис. 2).

На основании полученной структурной схемы была разработана математическая модель АДФР и получены графики переходных процессов в режиме регулирования скорости  $\omega = \text{var}$  (рис. 3) и перехода в режим удержания  $\omega = 0$  (рис. 4).

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– подача напряжения на ротор АДФР

позволяет реализовать режим удержания, но при этом появляются гармонические составляющие в переходном и установившемся режимах;

– увеличение напряжения на роторе приводит к снижению частоты вращения двигателя и увеличению колебательности момента и частоты вращения;

– режим держания реализуется при  $U_R = U_{Rном}$ . Колебательность момента и частоты вращения в данном режиме отсутствует.

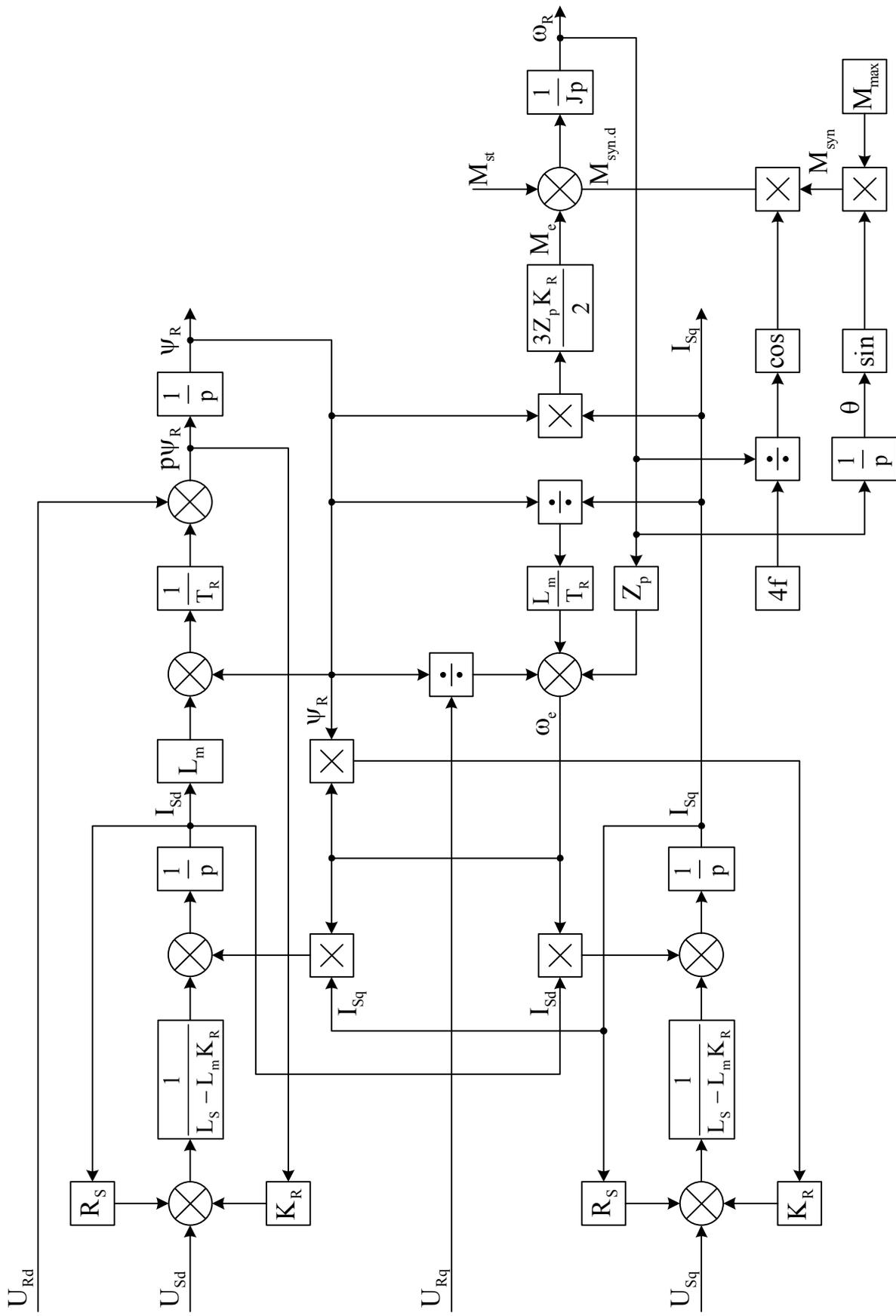


Рис. 2. Структурная схема АДФР

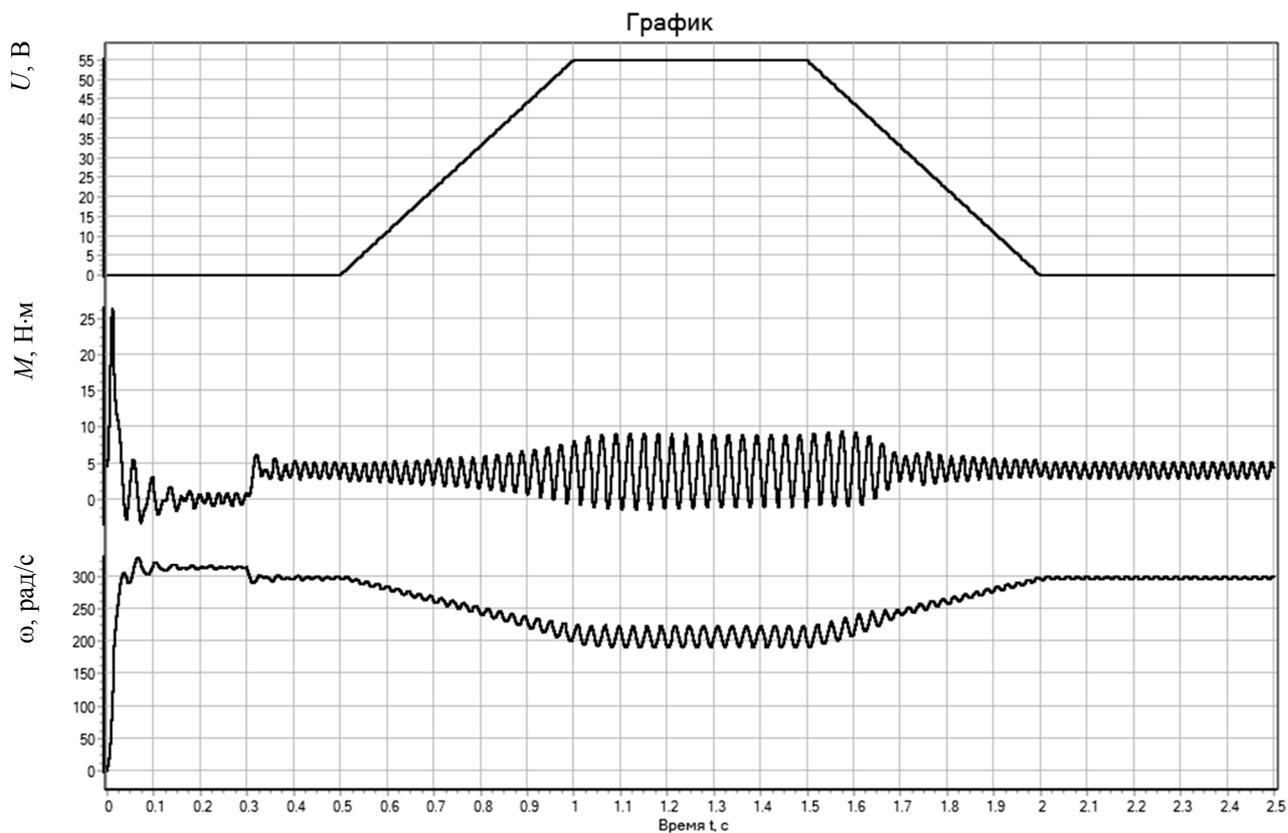


Рис. 3. График переходных процессов при  $\omega = var$

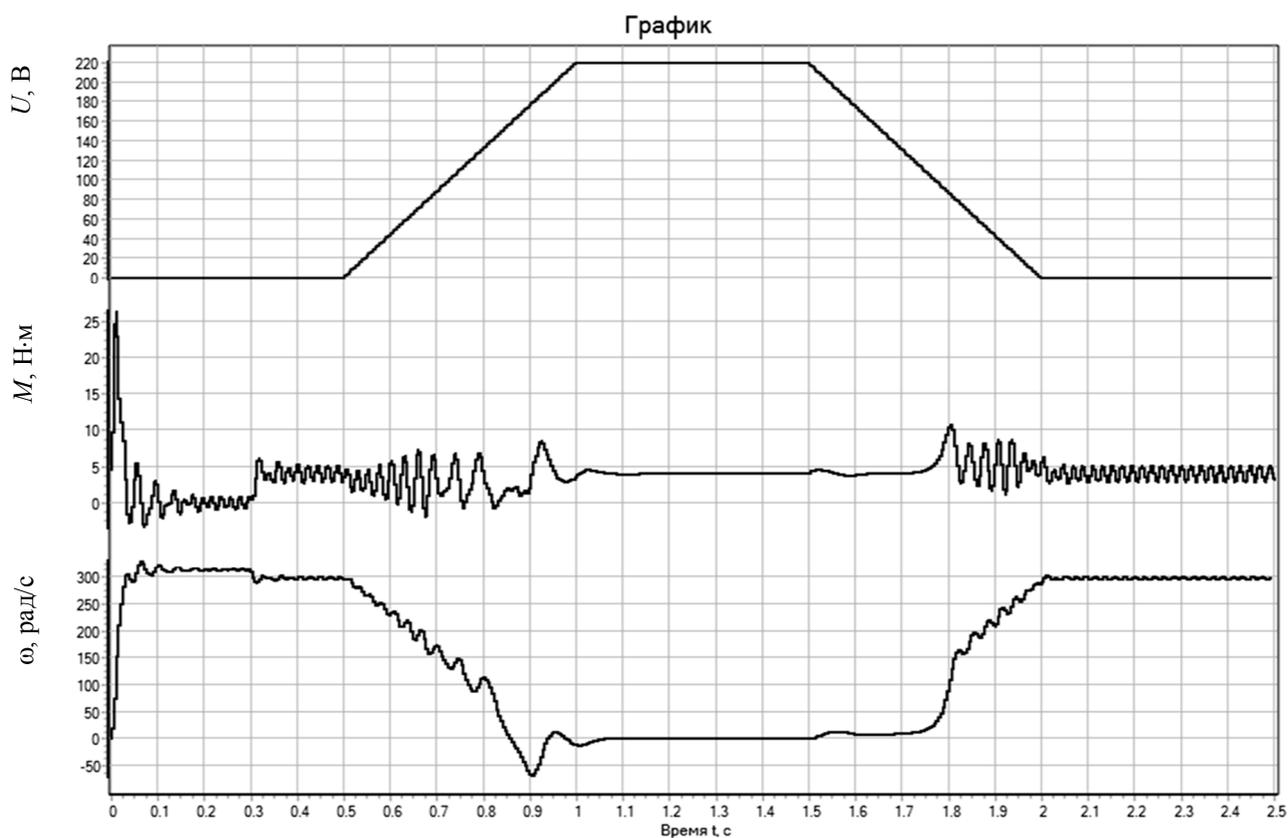


Рис. 4. График переходных процессов при переходе от  $\omega = \omega_n$  к  $\omega = 0$

ЛИТЕРАТУРА

1. **Белов М.П.** Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учеб. для вузов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. М.: Академия, 2004. 576 с.

2. **Онищенко Г.Б.** Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания / Г.Б. Онищенко, И.Л. Локтева. М.: Энергия, 1979. 200 с.

3. **Копылов И.П.** Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. М.: Высш. шк., 2001. 327 с.

4. **Анучин А.С.** Системы управления электроприводов: учеб. для вузов / А.С. Анучин. М.: ИД МЭИ, 2015. 373 с.

5. **Ключев В.И.** Теория электропривода: учебник для вузов / В.И. Ключев. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.

6. **Волков Н.И.** Электромашинные устройства автоматики: учеб. пособие для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика» / Н.И. Волков, В.П. Миловзоров. М.: Высш. шк., 1978. 336 с.

7. **Доманов В.И.** Исследование работы асинхронного двигателя по упрощенной схеме двойного питания / В.И. Доманов, А.В. Доманов, Д.Г. Мурзаков // Электроника и электрооборудование транспорта («ЭЭТ»). 2018. № 2. С. 35-37.

**Доманов Виктор Иванович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Ульяновского государственного технического университета

**Мурзаков Дмитрий Геннадьевич** – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Ульяновского государственного технического университета

**Халиуллов Динар Салаватович** – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Ульяновского государственного технического университета

**Viktor I. Domanov** – Ph. D. (Technical Sciences), Associate Professor, Head: Department of Electric Drives and Automation of Industrial Installations, Ulyanovsk State Technical University

**Dmitrij G. Murzakov** – Postgraduate, Department of Electric Drives and Automation of Industrial Installations, Ulyanovsk State Technical University

**Dinar S. Khaliullov** – Postgraduate, Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Ulyanovsk State Technical University

*Статья поступила в редакцию 19.07.21, принята к опубликованию 12.08.21*

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.316.925.1

## РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

**М.И. Чупрыненко, К.С. Горячевский**

## IMPLEMENTATION OF ARC-FAULT PROTECTION IN A DIGITAL SUBSTATION AREA

**M.I. Chuprynenko, K.S. Goryachevsky**

*В статье рассмотрены проблемы в эксплуатации КРУ 6-10 кВ, уже применяемые принципы работы защиты от дуговых замыканий 6-10 кВ и предложены новые принципы, позволяющие защите иметь абсолютную селективность, применение которых поможет уменьшить число аварий в секциях шин 6-10 кВ. Была создана принципиальная схема и разработан алгоритм действия защиты, основанных на новых принципах. Рассмотрены преимущества и недостатки предлагаемого подхода к реализации дуговой защиты ячеек КРУ 6-10 кВ. Определено оборудование, необходимое для реализации новых принципов, предложены примеры необходимых комплектующих. Изучены возможности совмещения новых принципов с уже существующими защитами. Исследованы особенности оборудования, необходимые для установки защит на этих принципах на цифровые подстанции и преимущества этих защит в условиях цифровой подстанции.*

**Ключевые слова:** релейная защита и автоматика, защита от дуговых замыканий, цифровая подстанция, электрическая сеть с изолированной нейтралью, однофазное замыкание на землю, волоконно-оптический датчик, пирометрический температурный датчик

*The article discusses the problems in operation of 6-10 kV switchgears, reviews the available principles of protection against arc fault 6-10 kV, and suggests the new principles that ensure protection based on absolute selectivity. The use of the new principles will reduce the number of accidents in complete switchgears 6-10 kV. A schematic diagram and an algorithm for effective protection were developed based on these principles. The advantages and disadvantages of the proposed approach to implementation of arc protection 6-10 kV switchgear cells were evaluated. The facilities needed to implement these new principles, including the required component parts, were defined. The possibilities for combining the new principles with the existing protection system have been analyzed. The focus has been made on the characteristics of the equipment required for the protection system at digital substations based on these principles, as well as advantages of the protection system performing in conditions of digital substations.*

**Keywords:** relay protection and automation, arc fault protection, digital substation, electrical network with isolated neutral single-phase ground fault, fiber-optic sensor, pyrometric temperature sensor

### Введение

В современных комплектно-распределительных устройствах (КРУ) 6-10 кВ, стойкость которых к открытой дуге не превышает 1 секунды, как правило, выполняются два вида защиты шин: логическую и дуговую или дифференциальную и дуговую. Несмотря на селективность и быстродействие представленных защит шин КРУ и их совмещение, в современных условиях цифровой подстанции этого недостаточно. Аварийное отключение секции шин 6-10 кВ приводит к недоотпуску электроэнергии потребителям, нарушению технологического процесса, порче выпускаемой продукции. Короткое замыкание (КЗ) в КРУ сопровождается дугой, что приводит к выводу из строя электрооборудования, перерыву и ненадёжности схемы электроснабжения потребителей на время проведения ремонта. Одним из требований, предъявляемых к цифровым подстанциям, является предупреждение аварийных ситуаций и проведение заблаговременных ремонтов оборудования со снижающимися рабочими характеристиками изоляции. Для этого применяются разные способы контроля электрооборудования. Даже отключённое представленными защитами КРУ при возникающей дуге КЗ требует восстановления в течение нескольких часов, исходя из общей практики. Целью данной работы является разработка новых принципов работы дуговой защиты, позволяющих предотвратить КЗ до его возникновения.

### Теоретическая база

Короткие замыкания в распределительной сети вызывают появление больших токов и существенное падение напряжения на шинах электростанций и подстанций. Протекание больших токов способствует выделению большого количества тепла, нагреву и повреждению токоведущих частей в месте короткого замыкания и во всех устройствах, по которым проходит ток. Для уменьшения повреждений и поддержания стабильной работы неповреждённой части энергосистемы необходимо в кратчайшее время выявлять и отделять место повреждения от остальной энергосистемы.

Комплектное распределительное устройство представляет собой шкаф, содержащий отсеки трансформаторов тока и отходящего кабеля, выкатного элемента и вторичных цепей [1].

В настоящее время наиболее широко используются 3 типа защиты шин 6-10 кВ: логическая, дифференциальная и дуговая.

Логическая защита шин (ЛЗШ) представляет собой дополнительный комплект максимальной токовой защиты (МТЗ) с выдержкой времени 0,15-0,2 с. Он вводится в работу, если через защиту протекает ток, достаточный для срабатывания, и нет блокирующего сигнала от защит отходящих от шин линий. Если авария произошла на отходящей линии, то ЛЗШ на вводе секции шин 6-10 кВ (или секционный выключатель) блокируется, а МТЗ ввода работает с обычной селективной выдержкой времени, резервируя защиту линии.

Дифференциальная защита шин (ДЗШ) основана на сравнении токов во всех (полная ДЗШ) или некоторых (неполная ДЗШ) присоединениях. ДЗШ срабатывает, когда суммарный ток через контрольное устройство превышает значение уставки. При неполной ДЗШ несрабатывание при КЗ на незащищаемых присоединениях обеспечивается либо отстройкой токов срабатывания ДЗШ от КЗ на этих присоединениях, либо блокировкой ДЗШ от защит на этих присоединениях.

Дуговая защита обычно устанавливается дополнительно к ЛЗШ или ДЗШ, так как она основана на неэлектрическом принципе. Для её выполнения в ячейках КРУ устанавливаются датчики. Существует несколько типов ЗДЗ (защиты от дуговых замыканий) в зависимости от управляющей величины и датчиков:

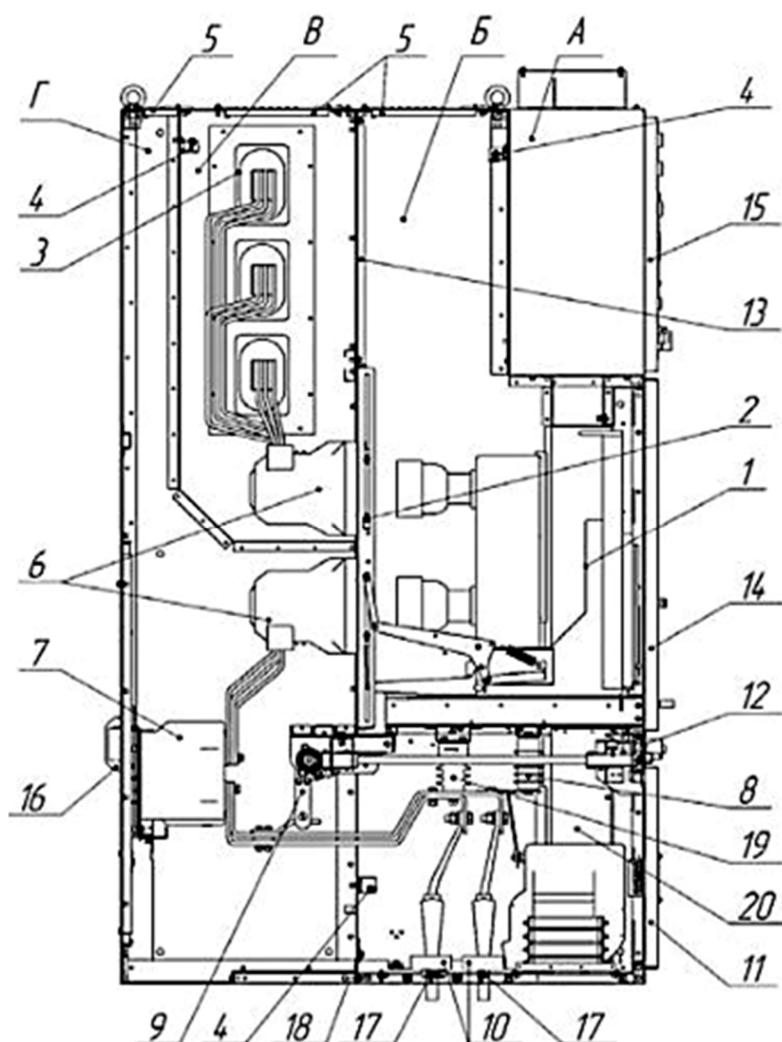
1. Клапанная дуговая защита, управляющей величиной является давление внутри ячейки. Основные преимущества: простота и низкая стоимость. Недостатком является вероятность сбоя при малых токах КЗ из-за недостаточного давления и ложного срабатывания при сквозном КЗ в линиях 6-10 кВ из-за механического воздействия ударного тока КЗ на ячейки.

2. Фототиристорная дуговая защита срабатывает от свечения электрической дуги. Обладает высокими чувствительностью и быстродействием. Её недостатки: сложность контроля исправности фототириستоров, ограниченный обзор, вероятность ложных срабатываний из-за токов утечки и от посторонних источников освещения и сниже-

ние характеристик срабатывания полупроводниковой части фототиристора со временем.

3. Световая ЗДЗ (СДЗ) с оптоволоконными датчиками обладает всеми преимуществами фототиристорной, лишена её недостатков, но существенно дороже [2].

Схема ячейки с расположением СДЗ показана на рис. 1.



**Рис. 1.** Пример конструктивного исполнения ячейки КРУ 10(6) кВ (Источник: [3]):

- А – отсек релейной защиты и автоматики (РЗА); Б – отсек выкатного элемента;
- В – отсек сборных шин; Г – отсек кабельных присоединений; 1 – кассетный выдвижной элемент;
- 2 – шторочный механизм отсека выдвижного элемента; 3 – проходной изолятор сборных шин;
- 4 – оптический датчик дуговой защиты; 5 – клапаны сброса избыточного давления;
- 6 – проходной изолятор главного контактного узла; 7 – трансформатор тока;
- 8 – ограничитель перенапряжения; 9 – заземлитель; 10 – трансформатор тока нулевой последовательности; 11 – дверь отсека присоединений; 12 – съемная перегородка между отсеками;
- 13 – съемная крышка доступа к отсеку сборных шин; 14 – дверь отсека выдвижного элемента;
- 15 – дверь отсека РЗА; 16 – съемная панель доступа в отсек присоединений;
- 17 – хомуты для крепления кабелей; 18 – шина заземления; 19 – опорные изоляторы с делителями напряжения; 20 – короб для прокладки внешних вторичных кабелей (левая боковина) и внутренних кабелей (правая боковина) электро монтажа ячейки [3]

Согласно [4], цифровой подстанцией называется подстанция, в которой организация всех потоков информации при решении задач мониторинга, анализа и управления осуществляется в цифровой форме, а параметры такой передачи определяются единым файлом электронного проекта. Передача информации в цифровой форме существенно расширяет возможности связи между элементами подстанции, между подстанциями и с диспетчерским пунктом. По цифровым каналам связи можно передавать информацию о состоянии устройства, о срабатывании конкретных датчиков и о параметрах работы сети оперативному персоналу ЦПС, на соседние подстанции и на диспетчерский пункт.

### Результаты и обсуждение

При упреждении КЗ в КРУ 6-10 кВ невозможно отстроиться от ошибок оперативного и ремонтного персонала, а также от животных, проникающих в ячейки через кабельные каналы. Но, как показывает практика, КЗ в КРУ предшествует однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) [5] (которое не является КЗ в сети с изолированной, компенсированной и резистивно-заземленной нейтралью [6]) через изоляторы или другое оборудование, либо плохое болтовое соединение наконечников силовых кабелей к шинам 6-10 кВ ячеек КРУ, шин с трансформаторами тока или шин между собой. При ослаблении соединения может возникать их перегрев, появляться налет из продуктов горения, искрение, которое может перерасти в межфазное КЗ. Этот процесс имеет место и при ослаблении втычных контактов выкатных элементов ячеек КРУ. Теоретически перемежающуюся дугу замыкания на землю или искрение ослабленных контактов и болтовых соединений могли бы отследить устройства ЗДЗ с оптоволоконными датчиками, если блокировка по току осуществляется от защит питающих секцию шин присоединений. На практике этого не происходит, потому что производители загроубляют срабатывание оптоволоконных датчиков. Таким образом они отстраиваются от освещения

для осмотра отсеков ячеек КРУ, так как при возникновении сквозного КЗ во время осмотра происходит аварийное отключение секции шин.

Получается, для упреждения КЗ в КРУ 6-10 кВ необходимо наряду с контролем светового потока, действующего на аварийное отключение секции шин, дополнительно ввести более чувствительный его контроль, действующий на сигнализацию и предупреждение оперативного персонала в режиме реального времени, для срочного перевода потребителей на другие источники питания и проведения ремонта. Однако для исключения ошибочности действия чувствительной СДЗ и отстройки от освещения отсеков требуется дополнительный фактор контроля и блокировки. Им может стать контроль нагрева токоведущих частей ячейки КРУ. В качестве примера реализации можно взять пирометрический температурный датчик ДТП-300 производства НПП «ТестЭлектро», с помощью которого можно производить непрерывное измерение температур важных зон главных цепей распределительного устройства [7]. Также существует перспективная разработка, сконструированная работниками Саратовского государственного университета, – беспроводной температурный датчик, не требующий питания. Данный датчик устанавливается непосредственно на токоведущие части, его связь с управляющим блоком осуществляется через радиоволны. Погрешность измерения составляет  $1^{\circ}\text{C}$  (для сравнения: датчик ДТП-300 обладает погрешностью в  $4^{\circ}\text{C}$ ).

Для реализации идеи требуется разработать оптоволоконный датчик с двумя уровнями контроля светового потока, бесконтактный пирометрический температурный датчик и электронный блок СДЗ с тремя уровнями срабатывания защиты. Каждому уровню контроля оптоволоконного датчика должно соответствовать подключение к отдельному дискретному входу блока СДЗ. Также к блоку СДЗ должны подключаться температурные датчики, направленные на высоковольтные токоведущие части ячейки КРУ, и которые логически привязываются

в блоке СДЗ к определённым отсекам ячейки, как и оптические датчики. В блоке должны быть заданы два уровня срабатывания температур. Первый уровень срабатывания температур токоведущих частей должен соответствовать температуре нагрева ослабленных контактов. При его срабатывании блок СДЗ должен выдавать сигнал в центральную сигнализацию и подстанционный коммутатор, а от него – и в центральную диспетчерскую службу (ЦДС), о необходимости проведения ремонта в конкретной ячейке. Освещение высоковольтных отсеков не будет оказывать влияния на работу первого уровня защиты блока СДЗ.

Второй уровень срабатывания блока СДЗ должен быть отстроен от светового потока однофазного замыкания на землю и уровня температуры, рассчитанного для ОЗЗ соответствующего отсека ячейки, и должен соответствовать первому уровню уставки каждого оптического датчика и второму уровню уставки каждого температурного датчика. Такой контроль позволит отстроиться от светового потока освещения высоковольтных отсеков ячейки КРУ и повысить селективность работы защиты. Опыт эксплуатации показал, что при КЗ в ячейке ионизированные газы проникают на шины КРУ, вызывая повторные замыкания, даже если КЗ было отключено выключателем присоединения. Второй уровень СДЗ позволит отключить ОЗЗ, при его возникновении на высоковольтных токоведущих частях от кабельных наконечников до нижних контактов банок тележки выключателя ячейки КРУ. Режим ОЗЗ в сети с изолированной, компенсированной и резистивно-заземлённой нейтралью не является аварийным, поэтому аварийно не отключается. Но, как показывает практика эксплуатации, при его возникновении в ячейках КРУ 6-10 кВ он может быстро перейти в режим КЗ из-за ионизации воздуха. Поэтому рационально было бы ОЗЗ отключить, пожертвовав присоединением ради сохранения электроснабжения остальных потребителей секции шин 6-10 кВ. Применить эту логи-

ку работы до настоящего времени не было возможности, так как ни одна защита не может определить точное место ОЗЗ в КРУ 6-10 кВ. Предлагаемый алгоритм устройства СДЗ позволит устранить этот недостаток; он применим для ячеек отходящих линий 6-10 кВ.

Дополнительным фактором контроля замыкания на землю в ячейке 6-10 кВ может служить контроль напряжения обмотки разомкнутого треугольника трансформатора напряжения, как отражено на рис. 2. Это повысит избирательность действий блока защиты, но одновременно усложнит схему блока и увеличит габариты, что приведёт к снижению надёжности и повышению стоимости. Чтобы этого избежать, можно принимать сигнал ОЗЗ от терминала защит трансформатора напряжения секции шин на дискретный вход блока ЗДЗ. В условиях цифровой подстанции сигнал ОЗЗ можно принимать через шину процесса, что позволит не увеличивать габариты блока.

Схема предлагаемой ЗДЗ представлена на рис. 2.

При возникновении ОЗЗ в высоковольтных частях ячейки КРУ 6-10 кВ от верхних контактов банок выключателей до сборных шин, второй уровень блока СДЗ должен посылать сигнал в центральную сигнализацию, подстанционный коммутатор и ЦДС для оповещения оперативным персоналом потребителей о переводе на другие источники питания. Этот алгоритм работы должен распространяться на все высоковольтные отсеки ячеек ввода, секционного выключателя, секционного разъединителя, трансформатора напряжения 6(10) кВ.

Третий уровень работы СДЗ предлагается оставить прежним. При возникновении светового потока, соответствующего КЗ в любом отсеке ячейки КРУ, блок СДЗ подаёт сигнал на питающие секцию шин присоединения, и при достижении уставки срабатывания тока блокировки происходит отключение.

Предлагаемый алгоритм работы ЗДЗ можно проиллюстрировать блок-схемой (рис. 2).

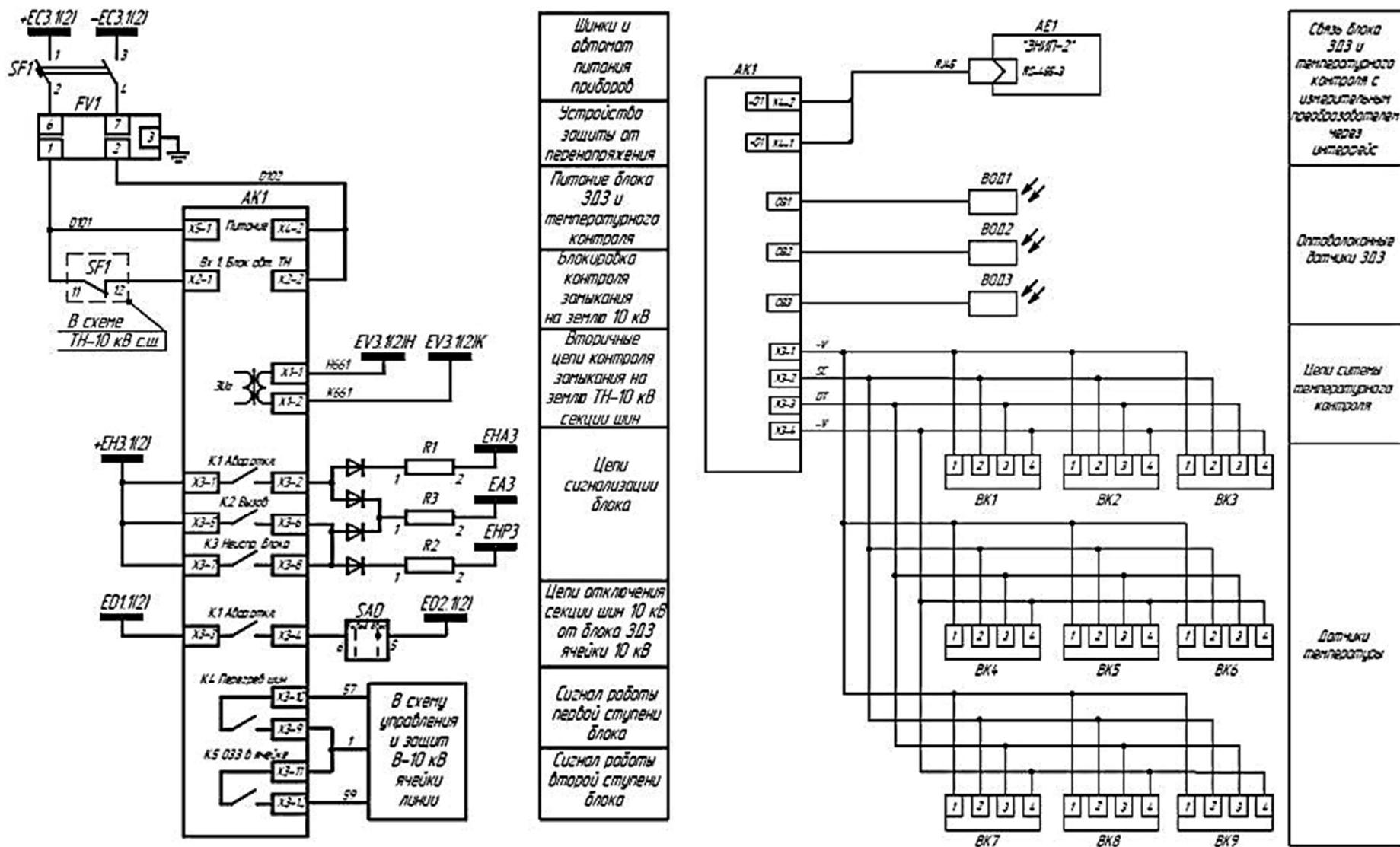


Рис. 1. Схема предлагаемой защиты от дуговых замыканий

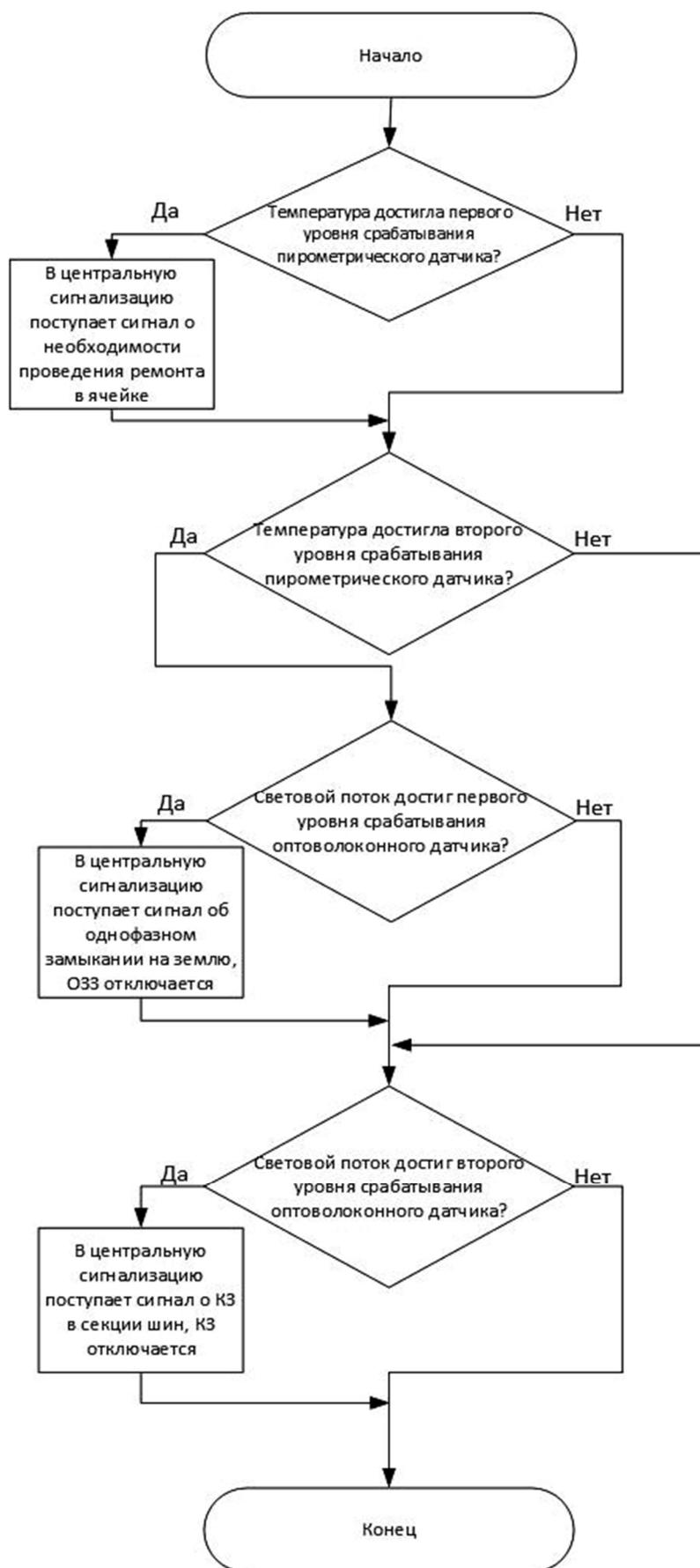


Рис. 3. Блок-схема, поясняющая принцип работы

Предлагаемая реорганизация ЗДЗ даёт преимущества в эксплуатации КРУ 6-10 кВ: существенное снижение количества аварийных режимов и перерывов в электроснабжении потребителей, высокая избирательность действий защит и оперативного персонала, возможное снижение количества проводимых ремонтов и времени восстановления оборудования КРУ после аварийного отключения. К недостаткам можно отнести усложнение ЗДЗ и, как следствие, повышение стоимости исполнения и обслуживания [8]. Однако это неизбежно в связи с требованиями, предъявляемыми к цифровым подстанциям, и они будут компенсироваться достоинствами предлагаемой ЗДЗ.

Предлагаемый блок ЗДЗ имеет преимущество перед существующими аналогами в условиях цифровой подстанции. С применением данной ЗДЗ подстанционный коммутатор может посылать сигналы о необходимости ремонта в конкретном отсеке ячейки (о срабатывании 1, 2 или 3 уровней защиты) на пульт диспетчера [9] для принятия оперативных решений по локализации повреждений и упреждению или устранению ненормальных и аварийных режимов работы оборудования КРУ. Это позволяет направить на ЦПС только персонал, нужный для устранения данной неисправности, и упрощает поиск неисправности, уменьшая время ремонта. Таким образом, сокращаются затраты на ремонт, уменьшаются амортизационные расходы и повышается экономич-

ность работы. Чтобы удовлетворять отечественным стандартам для РЗА ЦПС [10], блок дуговой защиты должен иметь интерфейсный выход (RS-485, оптоволоконный) для соединения с шиной процесса КРУ 6-10 кВ или для соединения с преобразователем сигналов ячейки, который связан с шиной процесса [11-13], а также устройство самодиагностики.

### Вывод

Совмещение старых физических принципов действия защит шин 6 кВ с новыми способно привести к появлению защит с абсолютной селективностью и большей чувствительностью по сравнению с имеющимися защитами секции шин 6-10 кВ. В частности, совмещение изложенных принципов защиты позволяет ограничить зону действия защит до размеров ячейки, в которой они расположены. Это расширяет перечень защит ячеек КРУ с абсолютной селективностью. Также сочетание этих принципов позволяет устранять причины коротких замыканий ещё до их возникновения, что помогает сберечь оборудование, уменьшить перерывы в электроснабжении, экономить на проведении послеаварийных ремонтов, снижать затраты времени и машино-часов на выявление причины аварии и повысить надёжность распределительных сетей в целом. В условиях ЦПС предлагаемый блок ЗДЗ проявляет высокую эффективность и функциональность в сравнении с существующими аналогами.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Распределительные устройства: виды, особенности конструкции [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://electricalschool.info/elstipod/1875-raspredelitelnye-ustrojstva-vidy.html> (дата обращения: 13.06.2021).

2. **Беляев А.В.** Вторичная коммутация в распределительных устройствах, оснащённых цифровыми РЗА / А.В. Беляев. СПб., 2008.

3. Комплектные распределительные устройства серии КРУ-СВЭЛ на напряже-

ние 10(6) кВ конструкции [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.elec.ru/files/2017/04/05/Katalog-KRU.pdf> (дата обращения: 13.06.2021).

4. Цифровая подстанция. Методические указания по проектированию ЦПС: СТО 56947007-29.240.10.299-2020: введ. 26.02.2020. М., 2020. 125 с.

5. **Чазов Ю.О.** Шунтирование однофазного замыкания на землю для предотвращения опасных перенапряжений в сетях с изо-

лированной нейтралью / Ю.О. Чазов, И.А. Перминов, Н.П. Кочетков // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2011. № 3 (28). С. 42-45.

6. **Боева Л.В.** Имитационная модель однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью / Л.В. Боева, Г.Ю. Киселёв // Молодой учёный. 2017. № 22 (156). Р. 26-30.

7. Температура высоковольтных соединений. Техника контроля от «ТестЭлектро» // Электротехнический рынок. 2018. № 5-6. С. 64-65.

8. Простое решение сложных задач // Релейщик. 2018. № 1 (31). С. 8-9.

9. Distributing Network Automation to Increase the Reliability Power Supply to Consumers / K.V. Petrov, A.I. Popov, I.A. Goryachevsky et al. // 2020 3rd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA). Вып. 3. Moscow: IEEE, 2020.

10. Технические требования к аппаратно-программным средствам и электротехническому оборудованию ЦПС: СТО 56947007-29.240.10.256-2018: введ. 21.09.2018. М., 2018. 130 с.

11. **Легуновский Д.Н.** Российские производители достигли совместимости при работе по шине процесса МЭК 61850-9-2L // Релейная защита и автоматизация. 2011. № 4 (5). С. 58-60.

12. **Еременко В.Т.** Моделирование процессов информационного обмена в сетях на основе полевых шин / В.Т. Еременко, С.А. Максаков, Е.В. Косчинская // Известия Орловского государственного технического университета. Сер. Информационные системы и технологии. 2007. № 4-2. С. 41-46.

13. **Томас Р.** Инновационные решения реализации цифровых подстанций / Р. Томас, А. Босма // Релейщик. 2020. № 2 (37). С. 36-39.

**Чупрыненко Михаил Игоревич** – студент Института энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

**Горячевский Константин Сергеевич** – старший преподаватель Института энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

**Mikhail I. Chuprynenko** – Undergraduate, Institute of Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

**Konstantin S. Goryachevsky** – Senior Lecturer, Institute of Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

*Статья поступила в редакцию 13.07.21, принята к опубликованию 12.08.21*

УДК 621.31

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ  
ЭЛЛИПСНОСТИ СТАТОРА НА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМОБИЛЬНОЙ  
СИНХРОННОЙ ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ**

**В.Н. Козловский, А.С. Саксонов**

**COMPUTER MODELING FOR EFFECTS OF TECHNOLOGICAL  
CHARACTERISTICS IN FORMING STATOR ELLIPTICITY ON ELEC-  
TROMECHANICAL PROPERTIES OF VEHICULAR SYNCHRONOUS  
GENERATORS**

**V.N. Kozlovskiy, A.S. Saksonov**

*В работе приводятся результаты компьютерного моделирования влияния эллипсности статора синхронного генератора автомобильной генераторной установки типа 9402.3701-14М на электромагнитные параметры указанной электрической машины, такие как электромагнитная индукция в воздушном зазоре и магнитное напряжение этого воздушного зазора.*

*Ключевые слова: компьютерное моделирование, автомобильная генераторная установка, синхронный генератор*

В работе [1] нами был описан математический аппарат для оценки влияния эллипсности статора синхронного генератора автомобильной генераторной установки на выходные электромеханические характеристики электрической машины. На основе этой работы мы выполнили разработку математической модели эллипсного статора синхронного генератора автомобильной генераторной установки с применением ПО «Simulink».

Цель моделирования – показать влияние конфигурации воздушного зазора (ВЗ) на электромагнитные параметры

*The article presents the results of computer simulation relating the influence of stator ellipticity of a synchronous generator in the vehicular generator 9402.3701-14M on electromagnetic parameters of the specified electric machine, including electromagnetic induction in the air gap and magnetic voltage of the given air gap.*

*Keywords: computer modeling, vehicular generator set, synchronous generator*

синхронного генератора автомобильной генераторной установки на примере эллипсного статора электрической машины.

Структура модели представлена на рис. 1. В модели используются конструктивные параметры синхронного генератора (СГ) в составе автомобильной генераторной установки (АГУ) типа 9402.3701-14М используемый на автомобилях марки LADA (семейства Prioga, Kalina, Granta). Для задания эллипсности используется математический аппарат, приведенный в [1].

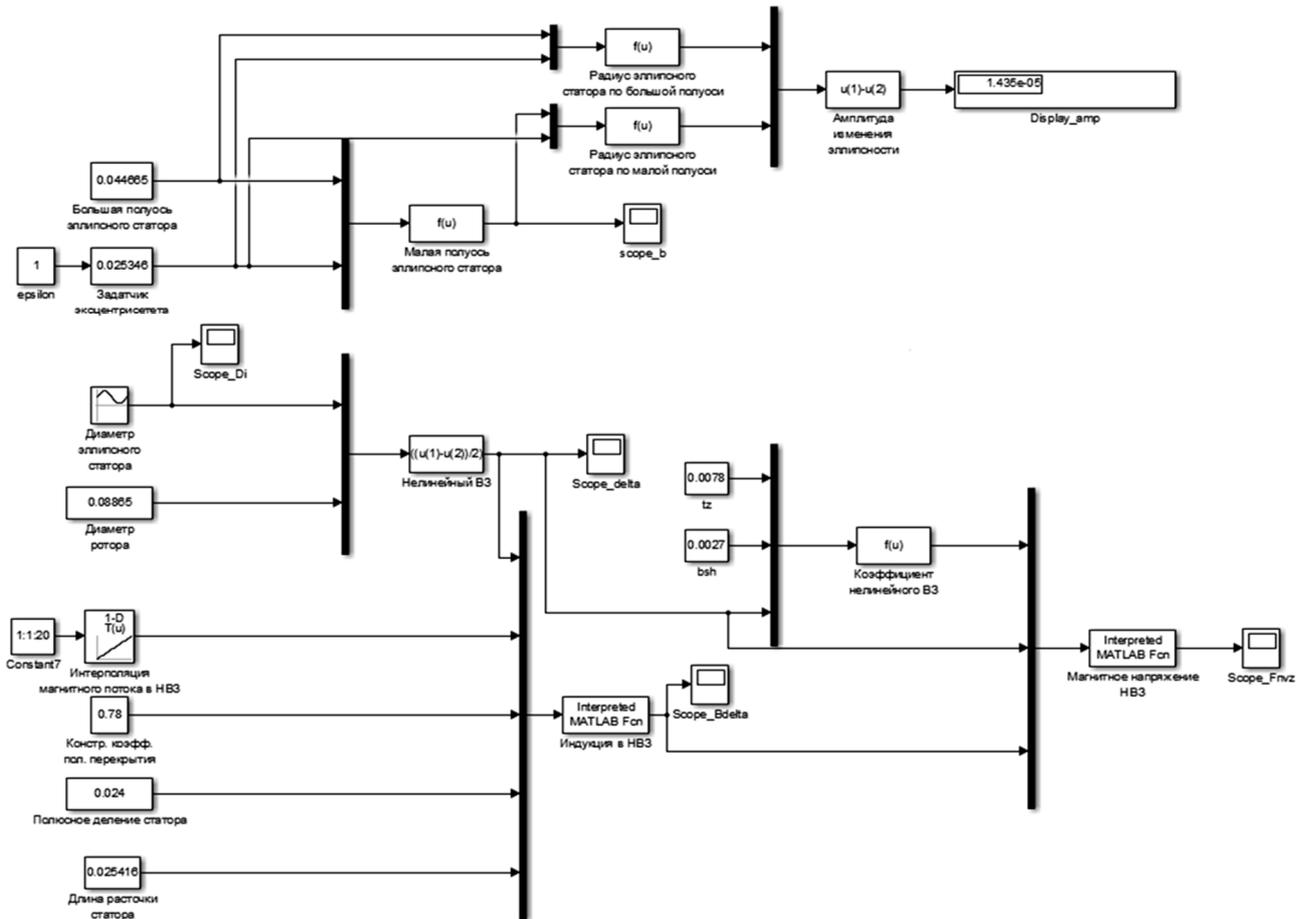


Рис. 1. Математическая модель эллиптического статора СГ АГУ

Математическая модель состоит из 5 блоков:

1) блок задания эллипсности – посредством выражений из [1] выполняется вычисление амплитуды изменения эллипсности статора;

2) блок расчета эллипсного диаметра статора СГ АГУ – выполняет расчет эллипсного диаметра статора посредством выражения диаметра статора в гармонической форме [1];

3) блок расчета нелинейного воздушного зазора (НВЗ) – выполняется расчет значения НВЗ с учетом эллипсности статора [1];

4) блок расчета электромагнитной индукции в НВЗ – выполняет расчет электромагнитной индукции в нелинейном воздушном зазоре по двадцати значениям магнитного потока в этом НВЗ;

5) блок расчета магнитного напряжения в нелинейном воздушном зазоре – выполняет расчет магнитного напряжения в не-

линейном воздушном зазоре машины по двадцати значениям электромагнитной индукции в этом НВЗ.

Для расчета электромагнитной индукции в НВЗ используются два выражения [2]. Сначала запишем выражение

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{\alpha_i \tau l_i},$$

где  $B_{\delta}$  – индукция в НВЗ;  $\Phi_{\delta}$  – магнитный поток в НВЗ;  $\alpha_i$  – коэффициент полюсного перекрытия;  $\tau$  – полюсное деление статора;  $l_i$  – длина статора.

Теперь запишем выражение коэффициента полюсного перекрытия:

$$\alpha_i = \alpha_p + \frac{4}{\frac{\tau}{\delta} + \frac{6}{1 - \alpha_p}},$$

где  $\alpha_i$  – коэффициент полюсного перекрытия;  $\alpha_p$  – конструктивный коэффици-

ент полюсного перекрытия;  $\delta$  – нелинейный воздушный зазор. Подставляя в исходное выражение электромагнитной индукции выражение коэффициента полюсного перекрытия, получаем следующее выражение:

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{\alpha_p + \frac{\tau}{\delta} + \frac{4}{6} \tau l_i}.$$

С помощью этой подстановки хорошо заметна связь между НВЗ и индукцией в этом НВЗ. Перед моделированием необходимо задаться начальными условиями.

Начальными условиями выступают следующие параметры: размер большой полуоси эллипсного статора СГ, диаметр ротора, значение эксцентриситета эллипсного статора СГ, конструктивный коэффициент полюсного перекрытия, полюсное деление статора СГ, длина расточки статора СГ. Значения этих параметров приведены в таблице ниже.

Далее приведем результаты математического моделирования эллипсного статора СГ. На рис. 2 показано изменение диаметра эллипсного статора СГ.

Конфигурация статора СГ будет влиять на конфигурацию ВЗ. Эта зависимость отражена на рис. 3.

Начальные условия

Параметр	Значение
Большая полуось, м	0,044665
Эксцентриситет	0,025346
Диаметр ротора, м	0,08865
Конструктивный коэффициент полюсного перекрытия	0,78
Полюсное деление статора, м	0,024
Длина расточки статора, м	0,025416

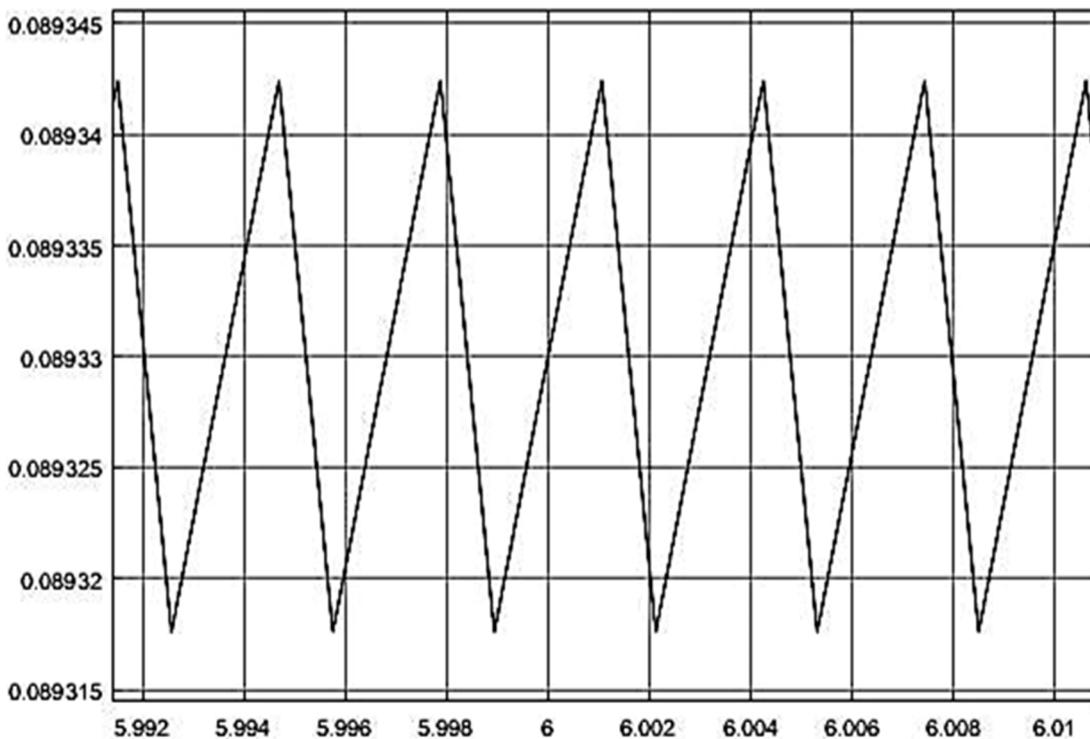


Рис. 2. Изменение диаметра статора при эллипсности

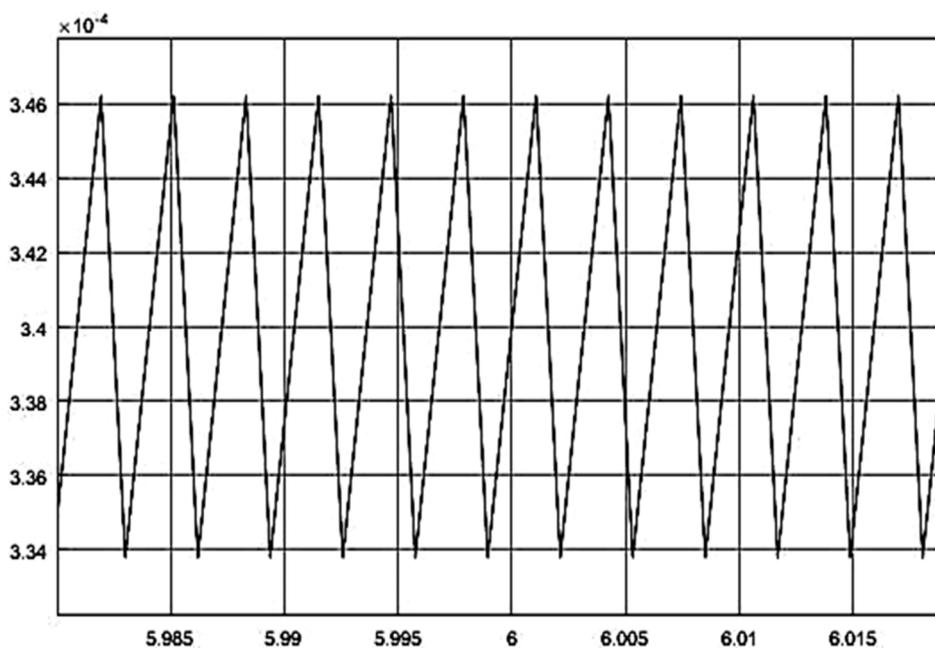


Рис. 3. Изменение НВЗ

Конфигурация НВЗ, в свою очередь, оказывает влияние на электромагнитную индукцию в этом НВЗ, согласно формуле (3).

На рис. 4 показано изменение электромагнитной индукции в НВЗ машины при двадцати значениях магнитного потока в НВЗ.

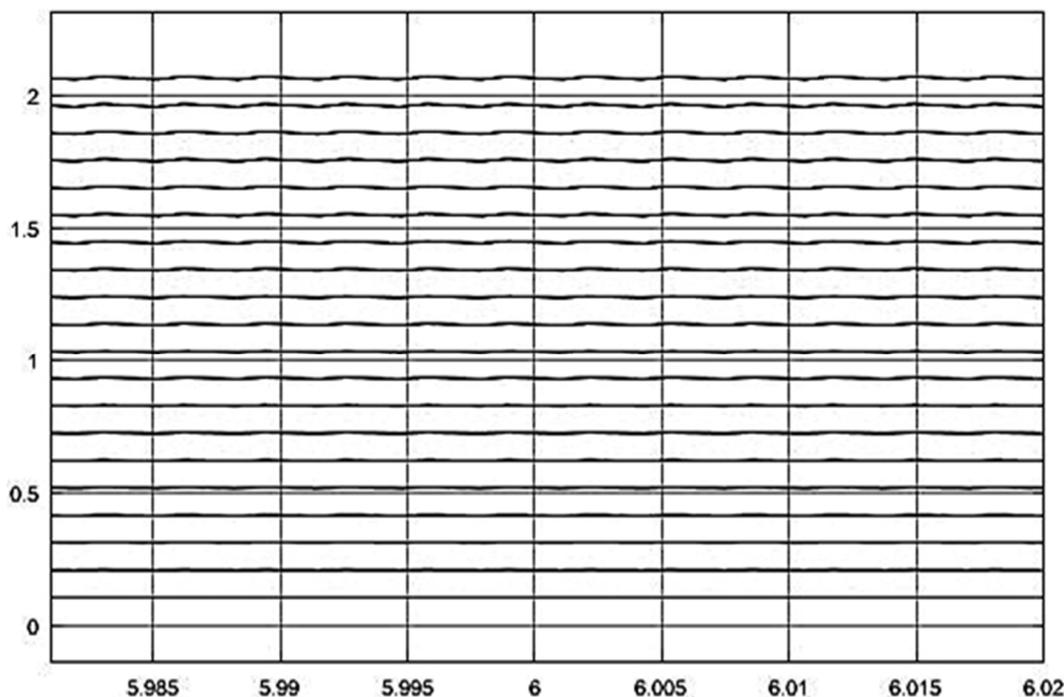


Рис. 4. Изменение индукции в НВЗ

Как заметно из рис. 4, с увеличением магнитного потока в НВЗ увеличиваются не только значения электромагнитной индукции в этом НВЗЭ, но и амплитуда колебаний этих значений.

Значение электромагнитной индукции в ВЗ оказывает сильное влияние на коэрцитивную силу и магнитную проницаемость ферромагнитных материалов, из которых изготавливаются узлы активной зо-

ны СГ АГУ [3], это следует из нижеприведенных формул [3]:

$$H = \frac{B}{\mu},$$

где  $H$  – коэрцитивная сила;  $\mu$  – магнитная проницаемость материала

$$\mu = \left( \frac{1}{\mu_0} \right) \frac{B}{H},$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума.

С помощью этих выражений становится понятно, что вслед за нелинейным характером электромагнитной индукции в НВЗ коэрцитивная сила и магнитная проницаемость материала активной зоны машины также будут приобретать нелинейный характер. Нелинейный характер коэрцитивной силы будет накладывать свой отпечаток на магнитные напряжения участков магнитной цепи машины, в общем случае это выражается формулой [4]:

$$F = Hl,$$

где  $F$  – магнитное напряжение участка магнитной цепи машины;  $l$  – длина магнитной силовой линии на участке магнитной цепи.

В частном случае, например для расчета магнитного напряжения ВЗ, используется выражение [2]:

$$F_{\delta} = 1,6k_{\delta} B_{\delta},$$

где  $F_{\delta}$  – магнитное напряжение ВЗ;  $k_{\delta}$  – коэффициент ВЗ.

Для определения коэффициента ВЗ используется формула

$$k_{\delta} = \frac{t_z + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_z}{b_{sh}}}{t_z + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_z}{b_{sh}} - b_{sh}},$$

где  $t_z$  – зубцовое деление статора;  $b_{sh}$  – ширина шлица паза.

На рис. 5 показано влияние нелинейного характера электромагнитной индукции в НВЗ на магнитное напряжение этого НВЗ.

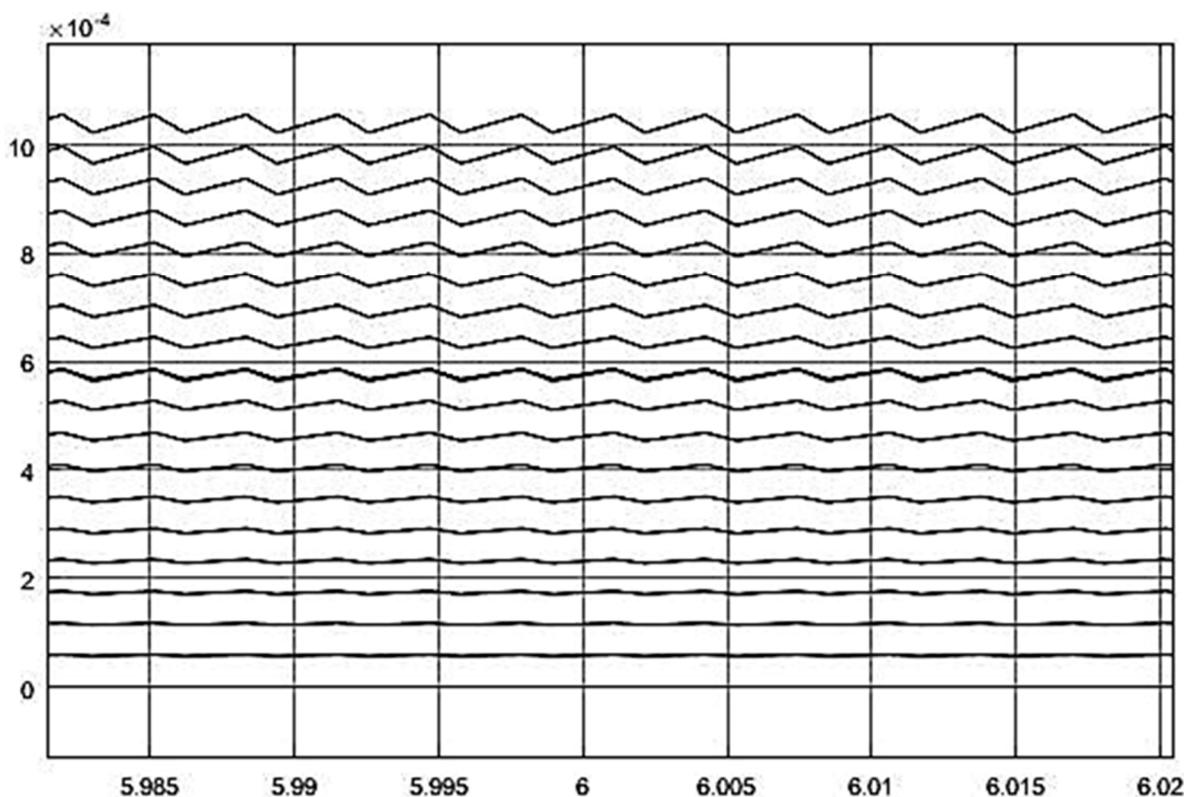


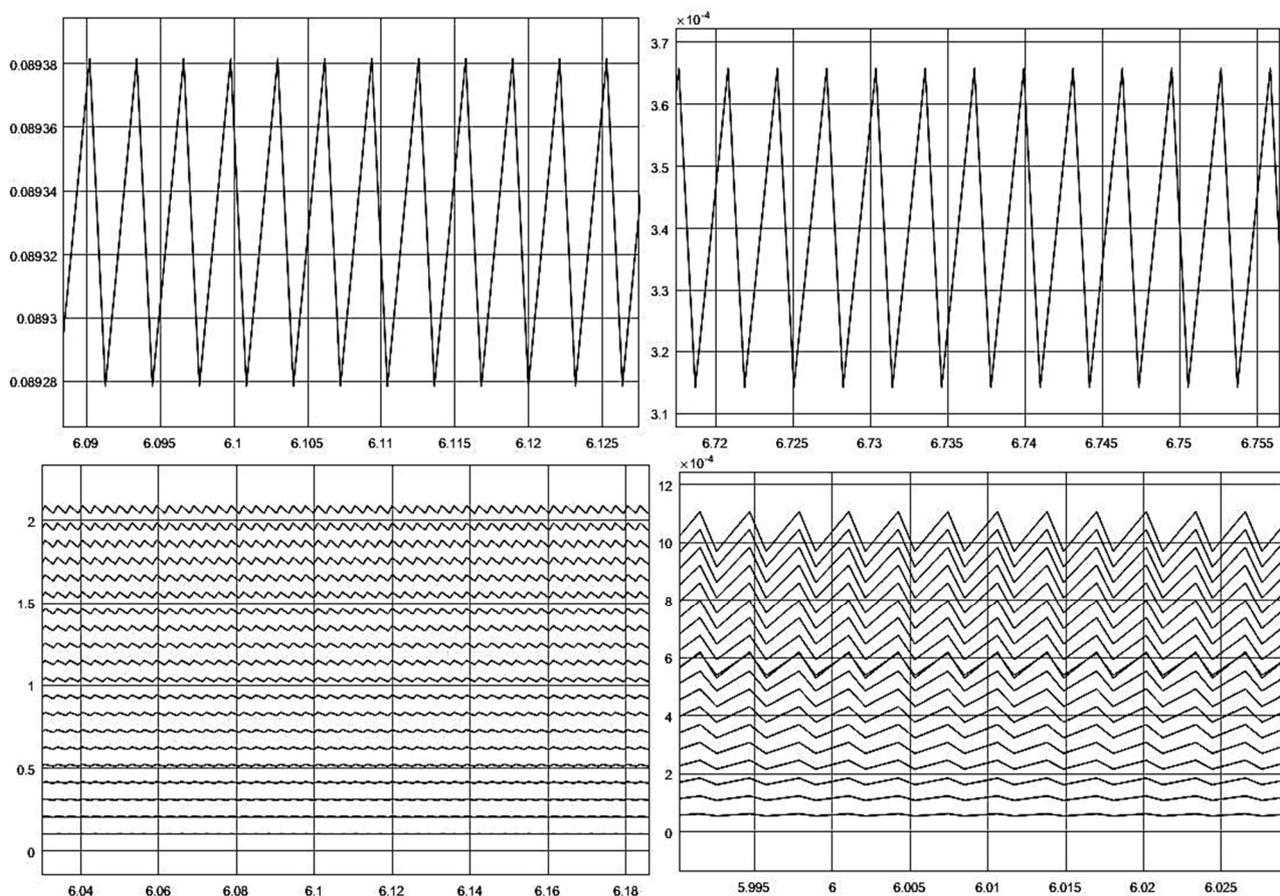
Рис. 5. Магнитное напряжение НВЗ

Заметно, что магнитное напряжение в НВЗ ведет себя подобно электромагнитной индукции, а именно увеличивается не только значение магнитного напряжения в НВЗ, но и амплитуда колебаний указанного магнитного напряжения.

Далее мы провели моделирование при увеличенном значении эксцентриситета эллипсного статора СГ, при  $\varepsilon = 0,051613$ .

Изменения диаметра эллипсного статора СГ, размера НВЗ, электромагнитной индукции в НВЗ а также магнитного напряжения НВЗ показаны на рис. 6.

Далее приводится сводная таблица со сравнением значений амплитуд колебаний электромагнитных параметров СГ АГУ при двух значениях эксцентриситета.



**Рис. 6.** Слева направо: изменения диаметра эллипсного статора, размера НВЗ, электромагнитной индукции в НВЗ, магнитного напряжения НВЗ

Сравнение значений амплитуд колебаний электромагнитных параметров СГ АГУ

Параметр	Значение амплитуды	
	$\varepsilon = 0,025346$	$\varepsilon = 0,051613$
Диаметр эллипсного статора, м	0,00003	0,0001
Размер НВЗ, м	0,000016	0,000049
Электромагнитная индукция в НВЗ, ТЛ	0,01	0,05
Магнитное напряжение НВЗ, А	0,03	0,12
Примечание: амплитуды электромагнитной индукции и магнитного напряжения рассчитаны при максимальных значениях		

Таким образом, нами показано влияние конфигурации НВЗ на электромагнитные параметры СГ АГУ. По результатам моделирования видно, что при увеличении значения эксцентриситета увеличиваются и амплитуды изменения электромагнитной индукции в НВЗ а также и магнитное напряжение НВЗ. Из результатов моделирования видно, что

магнитное напряжение НВЗ крайне чувствительно к изменению амплитуды электромагнитной индукции в НВЗ (см. рис. 5 и 6). Соответственно, нелинейный характер магнитных напряжений должен приводить к искажению электромеханических характеристик СГ АГУ, например характеристики холостого хода, это будет рассмотрено в следующей статье.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Саксонов А.С.** Разработка математического аппарата для оценки влияния эллипсности статора на выходные характеристики автомобильной генераторной установки / А.С. Саксонов, А.В. Крицкий, В.Н. Козловский // Изв. Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 7. С. 338-341.

2. **Балагуров В.А.** Проектирование специальных электрических машин перемен-

ного тока / В.А. Балагуров. М.: Высш. шк., 1982. 272 с.

3. **Буль Б.К.** Основы теории и расчета магнитных цепей / Б.К. Буль. М.: Энергия, 1964. 464 с.

4. Теоретические основы электротехники / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В. Чечурин. 4-е изд. СПб.: Питер, 2006. 463 с.

---

**Козловский Владимир Николаевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета

**Саксонов Александр Сергеевич** – аспирант кафедры «Теоретическая и общая электротехника» по профилю «Электротехнические комплексы и системы» Самарского государственного технического университета

**Vladimir N. Kozlovskiy** – Dr.Sc. (Tech.), Professor, Head: Department of Theoretical and General Electrical Engineering, Samara State Technical University

**Alexander S. Saksonov** – Postgraduate, Department of Theoretical and General Electrical Engineering, Samara State Technical University

*Статья поступила в редакцию 18.08.21, принята к опубликованию 20.09.21*

УДК 621.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ С ЗАМЫКАНИЕМ НА ЗЕМЛЮ

А.А. Андреев

## INVESTIGATION OF THE TRANSIENT PROCESS IN MEDIUM-VOLTAGE ELECTRICAL NETWORKS WITH A GROUND FAULT

A.A. Andreev

*В настоящий момент однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются наиболее частым видом повреждения в распределительных сетях среднего напряжения. Анализ замыканий на землю показывает, что отыскание ОЗЗ до сих пор является проблемой с неоднозначными решениями, особенно в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью. Существующие устройства защиты могут обеспечить селективное срабатывание в основном только в частных случаях, не относящихся к сетям с сильно разветвленной схемой и большим количеством отходящих присоединений. Поэтому с целью достоверного определения поврежденного присоединения во время однофазного замыкания на землю до сих пор применяются методы последовательного отключения. Для ограничения негативных последствий наиболее целесообразным в данных случаях является метод перегруппирования и разделения сети на участки. Выполнение оперативных переключений в ходе отыскания однофазных замыканий на землю рекомендуется проводить без перерыва электроснабжения потребителей, поэтому необходимо исследование переходного процесса, возникающего при объединении сетей на параллельную работу с целью проверки применимости предложенной методики.*

*Ключевые слова: однофазные замыкания на землю, электроснабжение, оперативные переключения, изолированная нейтраль, компенсированная нейтраль, кабельные линии*

*Currently, single-phase earth faults (SPEF) are the most common type of fault in the medium-voltage distribution networks. Analysis of ground faults shows that finding the SPEF is still an ambiguous case problem, particularly as regards the networks with isolated and compensated neutral.*

*Existing protection devices can ensure selective response, mainly in particular cases not related to the networks with highly branched circuits and large number of outgoing connections. Therefore, in order to reliably determine a faulty connection, during a single-phase earth fault, sequential disconnection methods are still used.*

*To limit the negative effects, in these cases the most appropriate method is associated with regrouping and dividing the network into sections. It is recommended to perform operational switching during the search for single-phase earth faults without interruption of power supply to consumers. Therefore, it is necessary to study the transient processes emerging when combining networks to perform parallel operations aimed to verify applicability of the proposed methodology.*

*Keywords: single-phase earth faults, power supply, operational switching, isolated neutral, compensated neutral, cable lines*

### Введение

Городское электроснабжение обеспечивает деятельность всей инфраструктуры города, а также находящихся рядом промышленных предприятий. Всё электрохозяйство проектировалось и проектируется с учётом увеличения потребляемых мощностей потребителей, поэтому городские электрические сети характеризуются своей массовостью и разветвленностью [1]. Исходя из опыта эксплуатации и рекомендаций руководящих документов, наиболее подходящим видом заземления нейтрали в данных сетях является компенсированный. Данный режим работы нейтрали, так же как и изолированный, имеет неоспоримое преимущество – отсутствует короткозамкнутый контур через землю и нейтраль источника ЭДС при однофазных замыканиях. Следовательно, малый ток замыкания на землю позволяет продолжать работу сети без отключения потребителей. Данные следствия не только косвенно повышают надежность электроснабжения потребителей, сокращая перерыв электропотребления во время однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), но и тем самым повышают ресурс силовых выключателей и снижают требования к заземляющим устройствам [2]. Однако режим работы сети с изолированной нейтралью имеет и целый ряд недостатков. К ним относятся: повышенные требования к межфазной изоляции, феррорезонансные явления, дуговые перенапряжения и сложность построения селективных защит. Хотя компенсация емкостных токов снижает риск перенапряжений и феррорезонанса [3], недостаток в сложности построения селективных защит до сих пор сохраняется.

По мнению авторов [4-6], комплексным решением создающихся проблем может стать применение резистивного заземления нейтрали. Это решение находит положительные отзывы, так как повышается селективность защит от ОЗЗ, а также в перспективе возможна автоматизация процесса поиска поврежденного присоединения. Однако эти преимущества противопоставлены недостаткам, так как будет происходить повышение тока ОЗЗ и встает вопрос об электро-

безопасности. Также нагревающийся при ОЗЗ резистор повышает опасность возникновения пожара, особенно в закрытых распределительных устройствах [7, 8]. На сегодняшний момент отсутствует регламентация данного решения со стороны государственного стандарта. Поэтому изменение режима работы нейтрали сети не может быть осуществлено подобным способом. Таким образом, внимание разработчиков уделяется повышению эффективности и усовершенствованию защит от замыканий на землю. Конечно, современные комбинированные защиты от ОЗЗ заметно помогают обслуживающему электротехническому персоналу в ходе поиска земли, но данные устройства только сужают круг поиска [9]. В разветвленных сетях с большим количеством отходящих присоединений, выполненных кабельными линиями, проложенными рядом друг с другом, произвести отстройку защит практически невозможно. Более того, в сетях с разнородным характером нагрузки и часто меняющейся схемой параметры емкости также непостоянны, что приводит к неселективным срабатываниям защит [10]. Поэтому в комбинации с современными защитами применяются методы последовательного отключения с целью однозначного определения отходящего присоединения с ОЗЗ. В результате возникает противоречие – работа сети в режиме ОЗЗ позволяет сохранить электроснабжение потребителей на период поиска повреждения, но поиск ОЗЗ в разветвленных сетях приводит к кратковременным отключениям потребителей. Применение же метода перегруппирования и последовательного деления сети на участки позволит ограничить нежелательные отключения потребителей в ходе поиска земли и оперативнее определять поврежденные отходящие присоединения. Следовательно, исследование переходных процессов, возникающих при переключениях в конкретных городских электрических сетях во время ОЗЗ, актуально, так как совмещение данного метода и существующих защит позволит определять поврежденное присоединение без отключения сторонних потребителей.

**Исследование переходного процесса при объединении сетей на параллельную работу при замыкании на землю**

Рассмотрим условную главную понижающую подстанцию, осуществляющую

электроснабжение городских потребителей (рис. 1).

При двухлучевой магистральной конфигурации сети каждая секция на ГПП запитывает соответствующую секцию шин на распределительном пункте (РП).

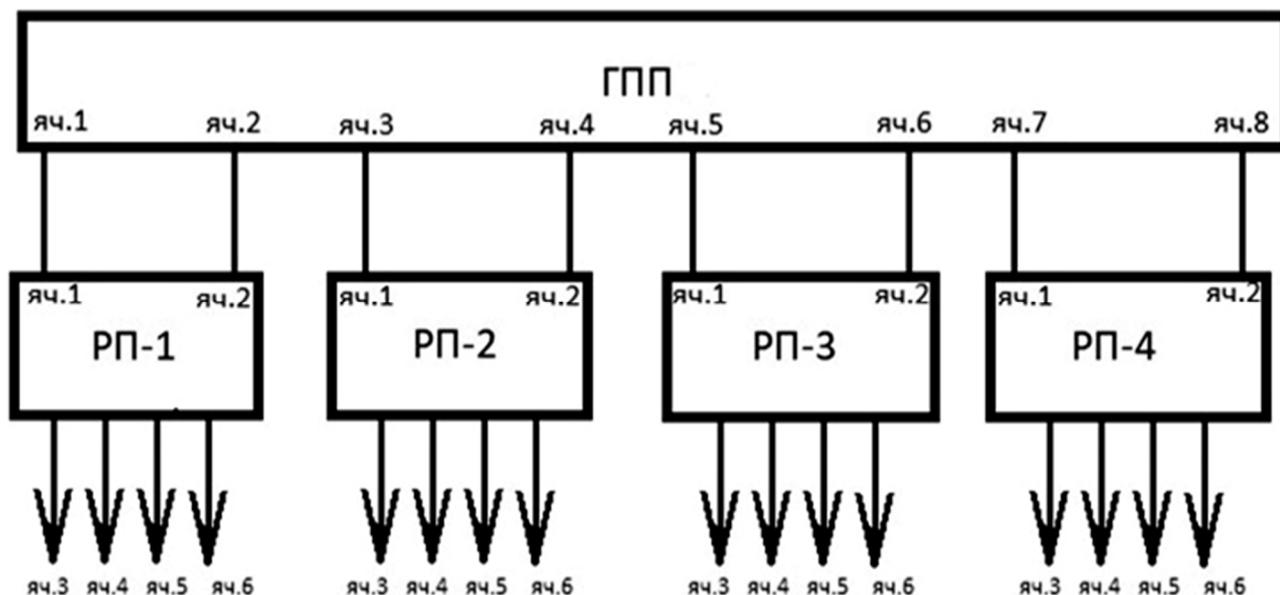


Рис. 1. Упрощенная структурная схема городской ГПП

Силовые трансформаторы на ГПП удовлетворяют условиям параллельной работы, поэтому объединение секций 10 кВ можно производить не только на ГПП, но и на отходящих РП. Подобные переключения бывают необходимы в ходе поиска «земли», так как количество отходящих присоединений на подстанциях может достигать нескольких десятков. Отключение же этих присоединений непосредственно с ГПП может привести не только к длительному перерыву электроснабжения, но и к неточности локализации поврежденного участка [11].

Физические характеристики данного переходного процесса возможно исследовать с помощью программного обеспечения Matlab Simulink (рис. 2).

Моделируемая схема содержит генератор (Simplified Synchronous Machine), ЛЭП, выполненную кабелем марки АСБ 3×120 (PI Section Line), трансформатор – ТМ 630/10/0,4 (Three-Phase Transformer)

и трехфазную нагрузку (Three-Phase RLC Load). Переключения производятся при напряжении 10 кВ. Все характеристики элементов схемы приближены к их реальным значениям. В момент времени 0,1 с происходит металлическое соединение фазы «С» с землей, с помощью однофазного ключа – Breaker. При этом напряжение на поврежденной фазе падает до нуля, а на фазах «А» и «В» увеличивается до своих линейных значений (рис. 3).

По данной осциллограмме видно, что в момент замыкания напряжение в неповрежденных фазах достигает 20 кВ амплитудного значения, что соответствует 14 кВ действующего значения. Ток в нейтрали, соответствующий току замыкания на землю, составляет около 25 А амплитудного значения (рис. 4).

Переходный процесс длился с момента замыкания, 0,1 с и приблизительно до момента 0,145 с.

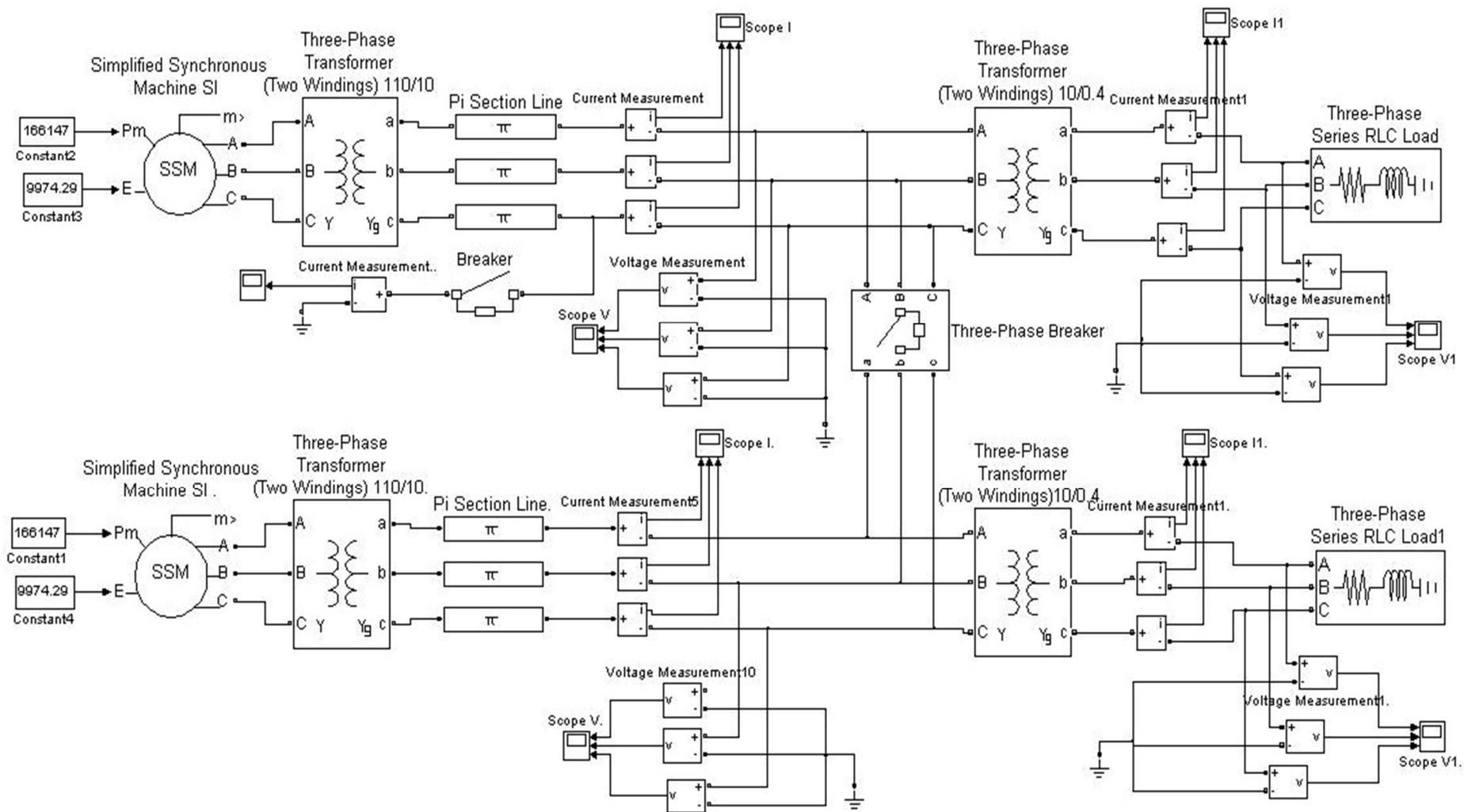


Рис. 2. Модель исследуемого участка распределительной кабельной сети 10 кВ

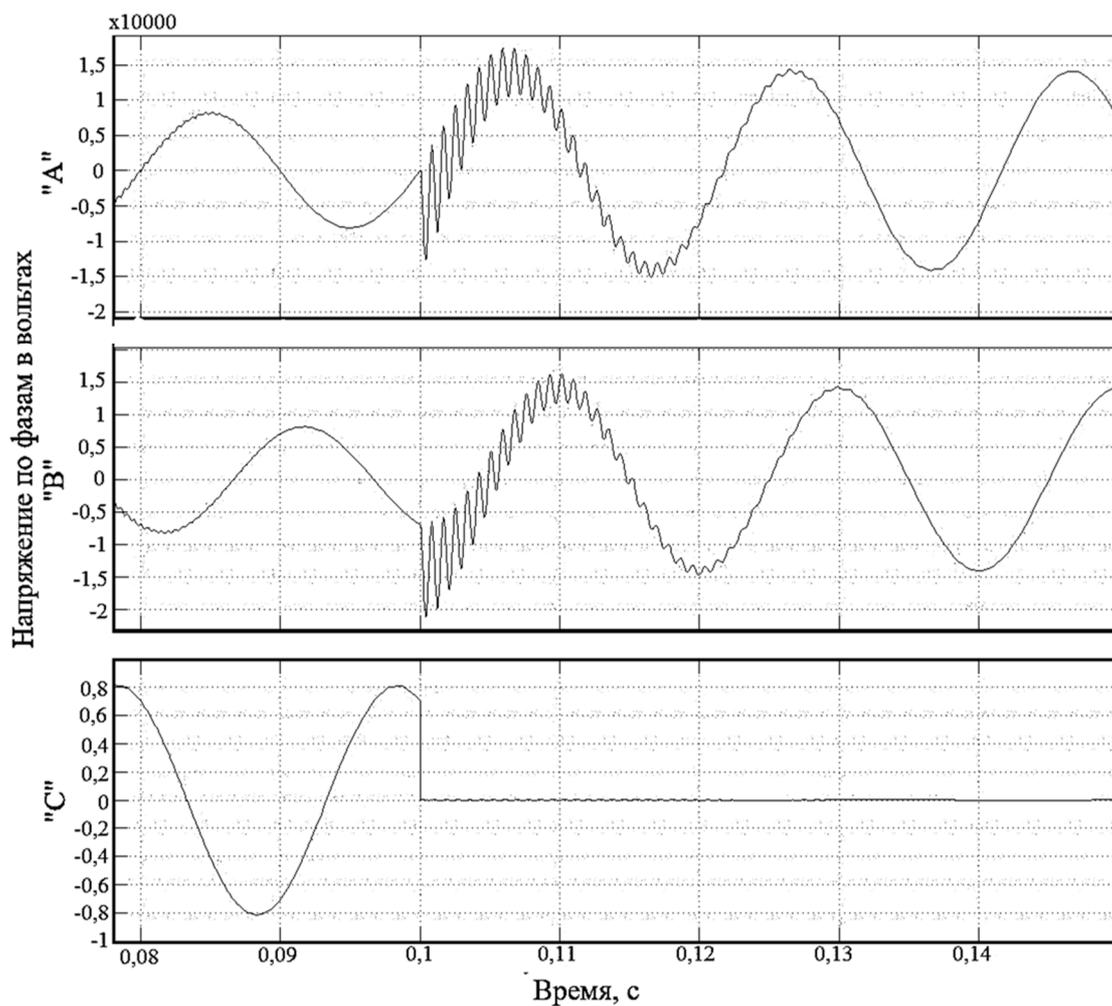


Рис. 3. Напряжения на одной секции при ОЗЗ

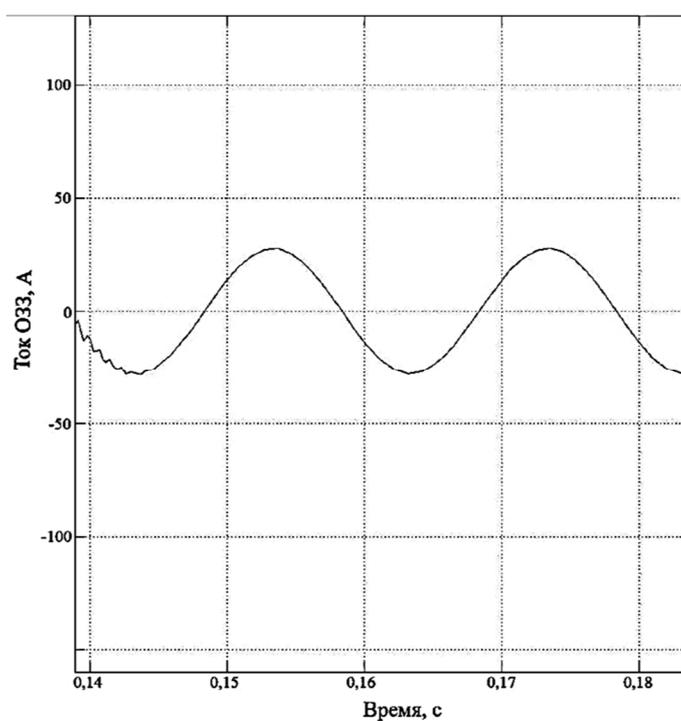


Рис. 4. Ток в нейтрали при ОЗЗ на одной секции

Далее моделируются оперативные переключения, производимые с целью локализации заземленного участка. Кратковременное объединение секции с ОЗЗ с секцией без ОЗЗ производится путем включения секционного выключателя – Three-Phase Breaker (рис. 2). Данное включение происходит через 0,2 с, то есть после замыкания на землю первой секции. Зависимость напряжения от времени при этих переключениях представлена на рис. 5.

По полученной осциллограмме видно, что в момент объединения секций, максимальное значение напряжения, которое достигается в неповрежденных фазах, состав-

ляет 17,5 кВ амплитудного значения, что соответствует 12,3 кВ действующего значения. В заземленной фазе напряжение временно возрастает до 3 кВ амплитудного значения. Ток замыкания на землю после объединения возрастает примерно в 2 раза (рис. 6).

Это объясняется идентичностью параметров обеих энергосистем. Так как ток замыкания на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью зависит от ёмкости неповрежденных фаз, в момент секционирования происходит добавление ёмкости второй сети к первой, следовательно ток ОЗЗ возрастает.

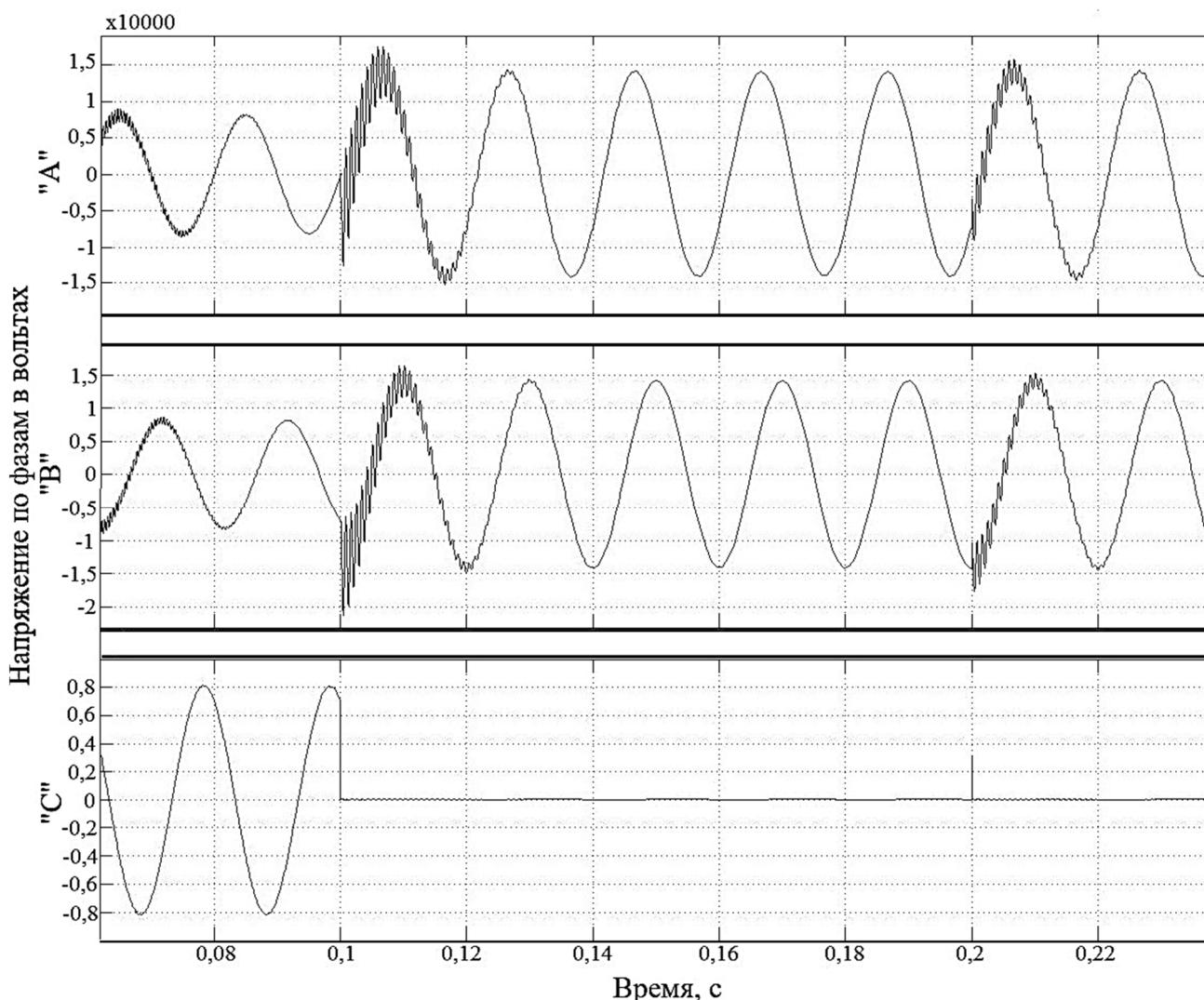


Рис. 5. Напряжение при ОЗЗ в момент объединения секций

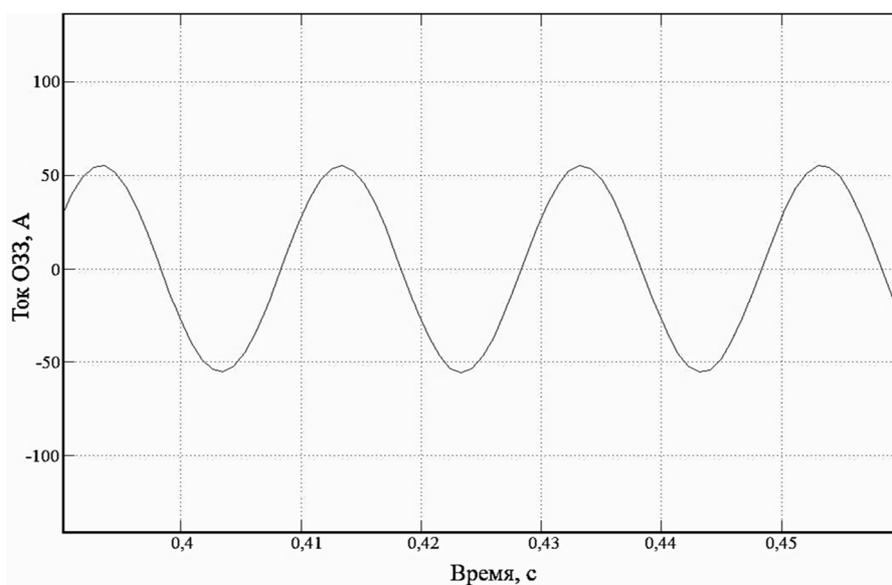


Рис. 6. Ток в нейтрали при ОЗЗ после объединения секций

### Результаты и обсуждение

При проведении данного моделирования рассматривались сети с двойным питанием, удовлетворяющие условиям резервирования городских электрических сетей. Параметры линий, трансформаторов и соответствующих секций были одинаковыми. В условиях эксплуатации перевод нагрузки с одной секции шин на другую производится без перерыва, кратковременно объединяя два трансформатора на параллельную работу [12]. Следовательно, идентичность электрических параметров сетей приближено соответствует реальным условиям. В ходе проведения моделирования производилось «металлическое» замыкание фазы с землей. То есть не учитывались переходные процессы, возможные в случае замыкания на землю через дугу. Исходя из того, что условия применения предлагаемой методики взяты для сетей с компенсированной нейтралью, то произведено допущение в отсутствие дуговых перенапряжений. Полную компенсацию емкостных токов на землю произвести довольно сложно, особенно в изложенных условиях эксплуатации, но ограничить перенапряжения до допустимых значений — это условие, которое в настоящий момент должно выполняться [13, 14]. Поэтому, подобные кратковременные всплески, сопровождающие переключения во время ОЗЗ, удовлетворяют допустимым кратностям перенапряжений.

Осуществление подобных переключений в ходе поиска земли позволит ограничить деструктивные отключения сторонних потребителей и повысить оперативность определения повреждения. Рассмотрим частный случай для городских электрических сетей, выполненных по магистральной двухлучевой схеме. Упрощенная электрическая схема ГПП представлена на рис. 7.

В случае возникновения замыкания на землю на отходящем присоединении первой секции шин РП-2 защита сработает на 1 с.ш. 10 кВ ГПП. Следовательно, на всех присоединениях этой секции шин будет перекос напряжений и для поиска ОЗЗ необходима проверка этих присоединений. Для исключения нежелательных отключений возможно производить кратковременное объединение секций шин 10 кВ на отходящих РП (рис. 8).

В частности, на РП-1 производится включение секционного выключателя и отключение ввода 1. В данном случае на ГПП ничего не произойдет и замыкание на землю также будет фиксироваться на 1 с.ш. 10 кВ. В случае выполнения данных переключений на РП-2 на ГПП произойдет переход замыкания на землю с 1 с.ш. на 2 с.ш. 10 кВ. Следовательно, распределительный пункт выбран верно, и уже возможно поочередное отключение отходящих присоединений.

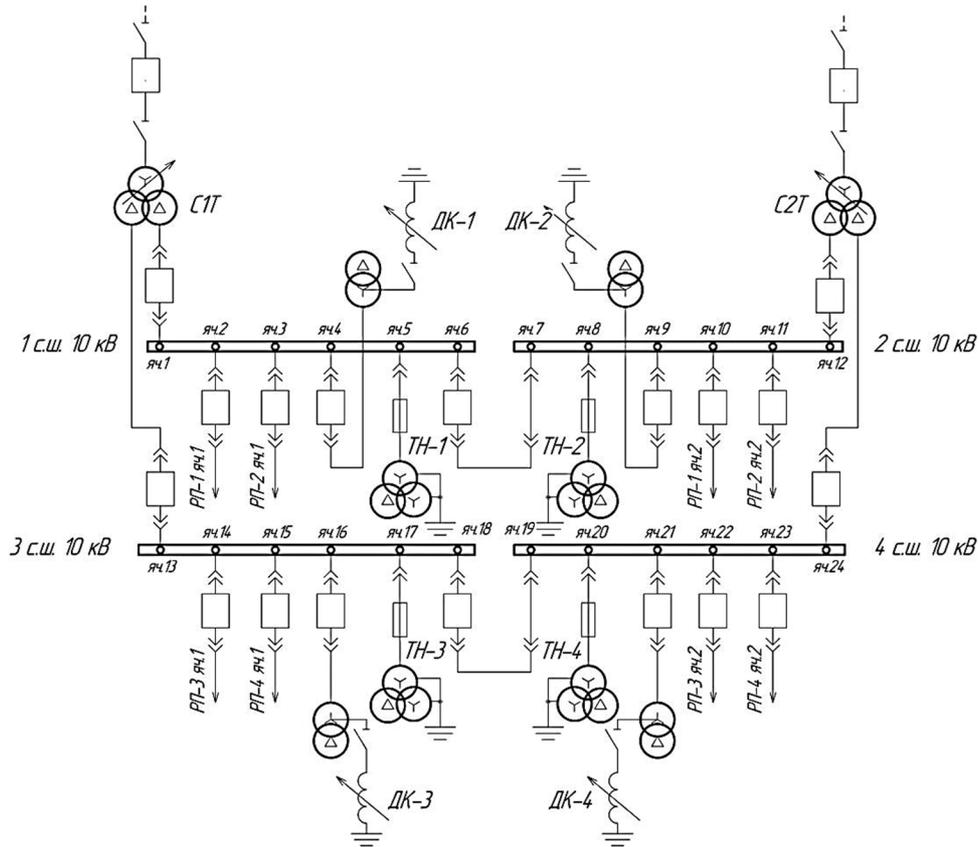


Рис. 7. Упрощенная электрическая схема ГПП

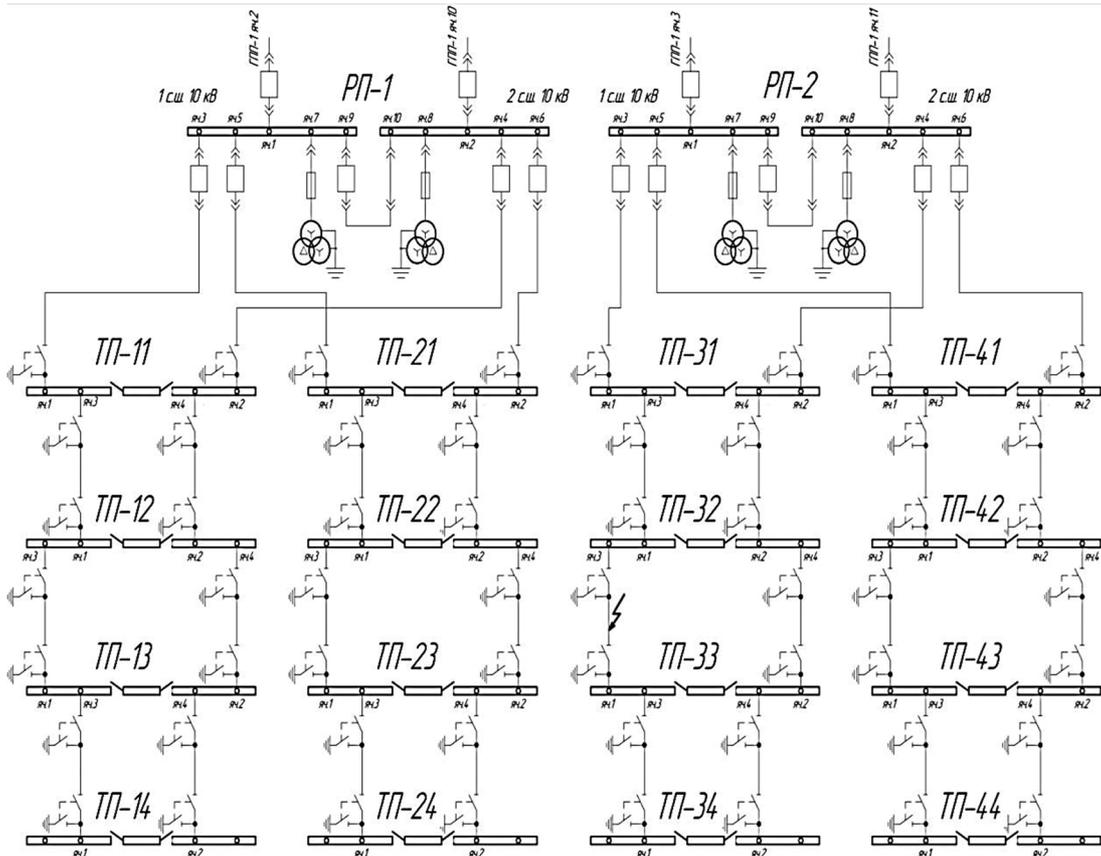


Рис. 8. Упрощенная электрическая схема участка городской сети

Также после определения РП с замыканием, возможен перевод нагрузки всех ТП с 1 с.ш. 0,4 кВ на 2 с.ш. 0,4 кВ через трансформаторную связь по низкой стороне. Данный способ уже полностью исключит нежелательные ограничения электроснабжения потребителей, но его применение должно быть обосновано продолжительностью работы ДГР.

### Заключение

Результаты проведенного моделирования показывают, что возникающие при

переключениях кратковременные перенапряжения не превышают допустимых значений. Производство этих переключений позволит уменьшить прерывания электроснабжения потребителей и ускорить поиск ОЗЗ. Однако без учета принятых допущений кратковременные перенапряжения могут быть опасны для изоляции изношенных кабелей. Поэтому перед производством подобных переключений необходим предварительный анализ конкретной сети.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Шведов Г.В.** Электроснабжение городов: электропотребление, расчетные нагрузки, распределительные сети: учеб. пособие / Г.В. Шведов. М.: ИД МЭИ, 2012. 268 с.
2. **Целебровский Ю.В.** Нормативное обеспечение режима нейтрали в электрических сетях / Ю.В. Целебровский // Режимы заземления нейтрали сетей 3-6-10-35 кВ: доклады науч.-техн. конф. Новосибирск, 2000. С. 3-6.
3. **Лыкин А.В.** Распределительные электрические сети 10/0,4 кВ с максимальным приближением трансформаторных подстанций к потребителям / А.В. Лыкин, Е.А. Уткин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. № 21 (3). С. 46-54.
4. **Куликова Н.А.** Резистивное заземление нейтрали – способ повышения надежности работ электрических сетей 6-35 кВ / Н.А. Куликова, О.М. Титоренко, В.А. Тяпкина // Энергетические установки и технологии. 2018. № 2. С. 32-38.
5. **Рыжкова Е.Н.** Экономическая эффективность перевода сетей электроснабжения 6-35 кВ в режим управляемого резистивного заземления / Е.Н. Рыжкова, Б.И. Кудрин, М.А. Фомин // Вестник МЭИ. 2013. № 3. С. 51-54.
6. **Широковец А.И.** Методические подходы к осциллографированию процессов при однофазных замыканиях на землю в электрических сетях 6-35 кВ / А.И. Широковец, М.В. Ильиных // Научные проблемы
- Сибири и Дальнего Востока. 2008. Спец. вып. № 1. С. 44-51.
7. Powering. Reliable. Future. Yesterday, today and tomorrow. RWE Annual Report. Essen, Germany: RWE Aktiengesellschaft, 2017.
8. **Bouziane B.** Smart Grid Reliability Using Reliable Block Diagram Case Study: Adrar's Isolated Network of Algeria / B. Bouziane, A. Elmaouhab // 2019 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET): proc. Istanbul, Turkey 26-27 august 2019. IEEE, 2019. <https://doi.org/10.1109/PGSRET.2019.8882711>.
9. **Филатов А.А.** Обслуживание электрических подстанций оперативным персоналом / А.А. Филатов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 304 с.
10. **Шуин В.А.** Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ: учеб. пособие / В.А. Шуин, А.В. Гусенков. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. 104 с.
11. **Zhang H.A.** Segmented Network Method Based Faulted Line Selection Strategy for Single-Phase Earth Fault in Small Current Grounding Distribution Network / H.A. Zhang // 2017 International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC). Dalian, 2017. P. 1582-1588.
12. **Шалин А.И.** Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. Достоинства и недостатки различных защит / А.И. Шалин // Новости электротехники. 2005. № 3 (33).

13. Приказ Минэнерго РФ от 30.06.2003 № 289 «Об утверждении Инструкции по предотвращению и ликвидации аварий в электрической части энергосистем».

14. **Титенков С.С.** Режимы заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ и организация релейной защиты от однофазных замыканий на землю / С.С. Титенков, А.А. Пугачев // Энергоэксперт. 2010. № 2.

---

---

**Андреев Антон Андреевич** – аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехника» Тольяттинского государственного университета

**Anton A. Andreev** – Postgraduate, Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Togliatti State University

*Статья поступила в редакцию 12.07.21, принята к опубликованию 12.08.21*

УДК 620.92

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТАРИФОВ НА ЭНЕРГОРЕСУРСЫ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ С ЦЕЛЬЮ СТИМУЛИРОВАНИЯ  
УВЕЛИЧЕНИЯ ДОЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ  
В БАЛАНСЕ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ**

**С.А. Александрович, Т.Г. Зорина**

**IMPROVEMENT OF ENERGY TARIFFS IN THE REPUBLIC  
OF BELARUS IN ORDER TO STIMULATE AN INCREASE  
IN THE SHARE OF ELECTRICITY IN THE ENERGY BALANCE SYSTEM  
OF BUILDINGS**

**S.A. Aliaksandrovich, T.G. Zorina**

*Проанализирована динамика тарифов на электрическую и тепловую энергию для нужд населения. Выполнен расчет уровня тарифа для населения на электрическую энергию, используемую для нужд отопления и горячего водоснабжения, равнозначного тарифу на тепловую энергию для этих целей. Разработаны направления совершенствования тарифной политики Республики Беларусь, которая будет способствовать стимулированию повышения доли электрической энергии в балансе энергоснабжения зданий. При решении поставленных задач применялся расчетно-аналитический метод и метод сравнительного анализа.*

*Ключевые слова: тарифная политика, динамика тарифов, электрическая энергия, тепловая энергия, совершенствования тарифной политики*

**Введение**

Одним из эффективных инструментов по обеспечению суточного регулирования электропотребления является тарифное регулирование. В условиях ввода в эксплуатацию БелАЭС реализация основного количества мероприятий по наращиванию электропотребления в республике, в том числе и переход к использованию электроэнергии на нужды отопления и горяче-

*The dynamics of tariffs for electric and thermal energy to satisfy the population needs is analyzed. The tariff level for the population for electric energy used in heating and hot water supply, equal to the tariff for thermal energy for the given purposes, has been estimated. The directions for improving the tariff policy in the Republic of Belarus have been developed, that will stimulate an increase in the share of electricity in the balance of energy supply to the buildings. When solving this set of tasks, the computational-analytical method and the method of comparative analysis were used.*

*Keywords: tariff policy, dynamics of tariffs, electric energy, heat energy, improvement of tariff policy*

го водоснабжения в жилом фонде, требует своевременного пересмотра существующей в Республике Беларусь тарифной политики.

**Литературный обзор**

Производство электроэнергии связано с четырьмя взаимосвязанными стадиями: генерирование, транспортировка, распределение и поставка конечным потре-

бителям. Такой вид монополии является вертикально интегрируемый. Именно это накладывает определенные ограничения на преобразования в электроэнергетике [1].

Исследования Зориной Т.Г. [2], Падалко Л.П. [3], Крыловой Е.Г. [4] посвящены анализу факторов, оказывающих влияние на формирование современной тарифной политики на электрическую и тепловую энергию в Республике Беларусь. В исследованиях рассматриваются основные направления формирования тарифов на энергию, в том числе вырабатываемую альтернативными источниками, а также даны рекомендации по совершенствованию комплексной тарифной политики на энергоресурсы Республики Беларусь с учетом ввода в эксплуатацию БелАЭС и развития ВИЭ.

Вопросам перекрестного субсидирования в электроэнергетике посвящены исследования Айзенберг Н.И. [1], Хуберта Ф. [5], направленные на определение возможности выхода на наилучшие решения в тарифообразовании, максимизирующие благосостояние общества, а также выявление преимуществ и недостатков отдельных схем регулирования для электроэнергетики России.

Работы Ткачука А.В. и др. [6], Золотовой И.Ю. [7] посвящены оценке влияния перекрестного субсидирования на изменение поведения участников рынка электроэнергии. Особое внимание уделено систематизации существующих механизмов перекрестного субсидирования и проведен анализ влияния объемов перекрестного субсидирования на изменение поведения субсидирующих и субсидируемых групп потребителей, выявлены и систематизированы ключевые факторы, оказывающие влияние на решение участников рынка энергии покупать или производить самостоятельно.

### Основная часть

С 01.01.2021 г. одноставочный тариф на электрическую энергию (в том числе в части использования электрической

энергии для нужд отопления и горячего водоснабжения) для населения, обеспечивающий полное возмещение экономически обоснованных затрат, составляет 0,23 руб./кВт·ч.

В настоящее время одноставочный тариф на электрическую энергию для населения, чьи квартиры оборудованы в установленном порядке электрическими плитами, составляет 0,1778 руб./кВт·ч, а для населения, чьи квартиры не оборудованы в установленном порядке электрическими плитами, – 0,2092 руб./кВт·ч [8].

Проанализируем динамику одноставочного тарифа на электрическую энергию, предусматривающего оборудование квартир электроплитами, в период 2013-2021 гг. (рис. 1).

Анализ рис. 1 показывает, что начиная с января 2013 г. по настоящее время одноставочный тариф на электрическую энергию вырос на 15 коп./кВт·ч, или в 6,48 раза.

Для исключения влияния инфляционных процессов изучим динамику одноставочного тарифа на электрическую энергию в долларах США за кВт·ч (рис. 2). Исследование динамики тарифов осуществлялось в долл. США, поскольку в июле 2016 года в Республике Беларусь была проведена деноминация национальной валюты.

Анализируя рис. 2, можно сделать вывод, что начиная с января 2013 г. по настоящее время одноставочный тариф на электрическую энергию вырос на 3,69 цента США/кВт·ч, или в 2,15 раза.

Для сравнения изучим динамику тарифов на тепловую энергию для населения за аналогичный период (рис. 3). В настоящее время тариф на тепловую энергию для населения составляет 20,6216 руб./Гкал.

Анализ рис. 3 показывает, что начиная с января 2013 г. по настоящее время тариф на тепловую энергию вырос на 14,31 руб./Гкал, или в 3,27 раза.

Для исключения влияния инфляционных процессов изучим динамику тарифа на тепловую энергию в долл. США/Гкал (рис. 4).

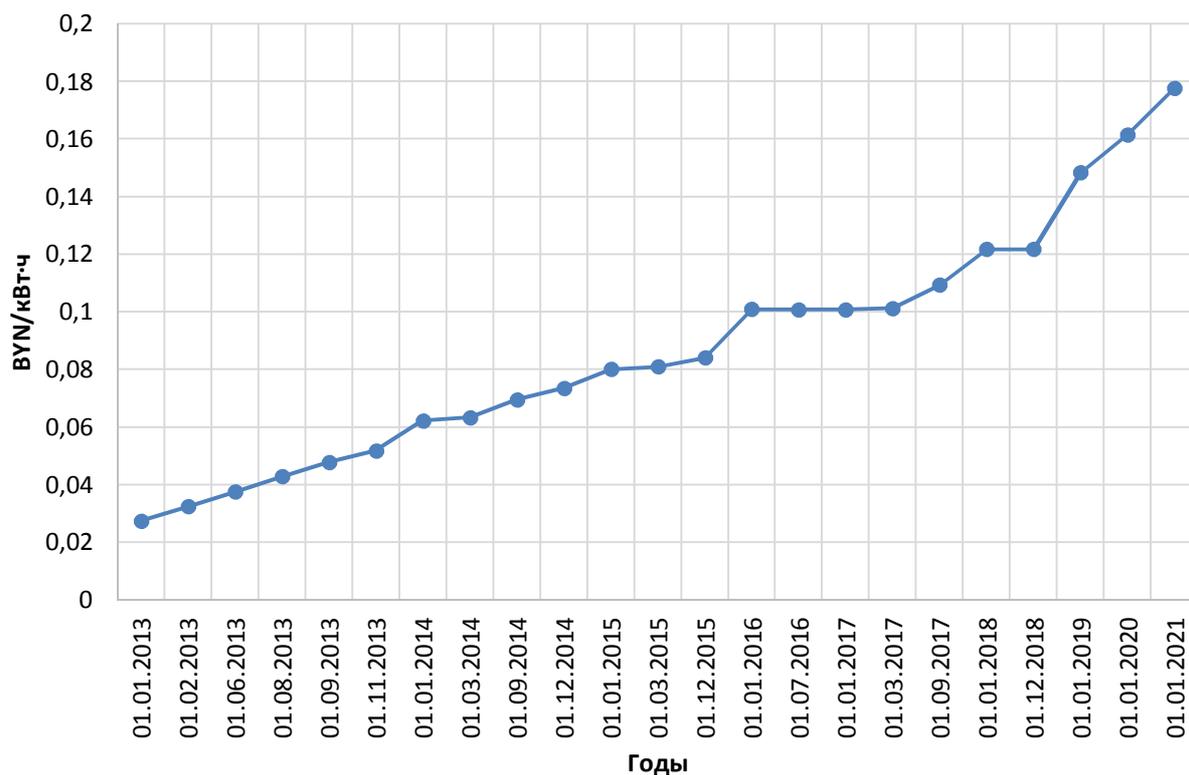


Рис. 1. Динамика тарифов на электрическую энергию в Республике Беларусь в 2013-2021 гг., руб./кВт·ч [9]

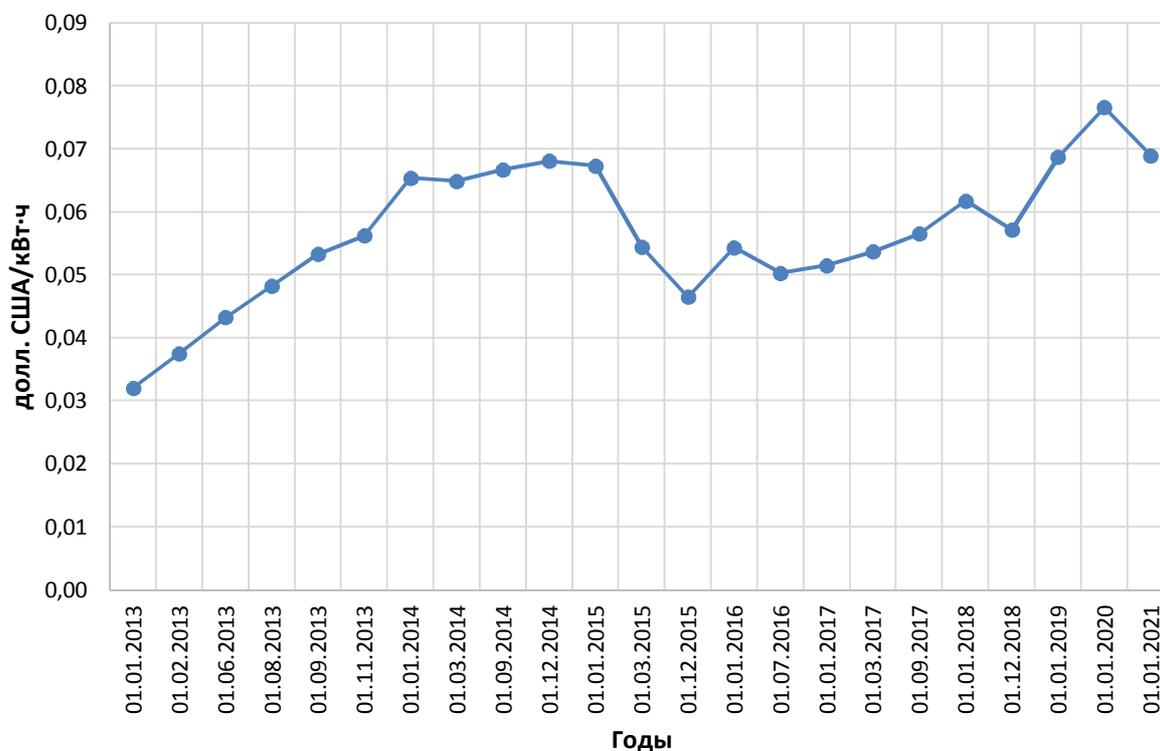


Рис. 2. Динамика тарифов на электрическую энергию в Республике Беларусь в 2013-2021 гг., долл. США/кВт·ч [9]

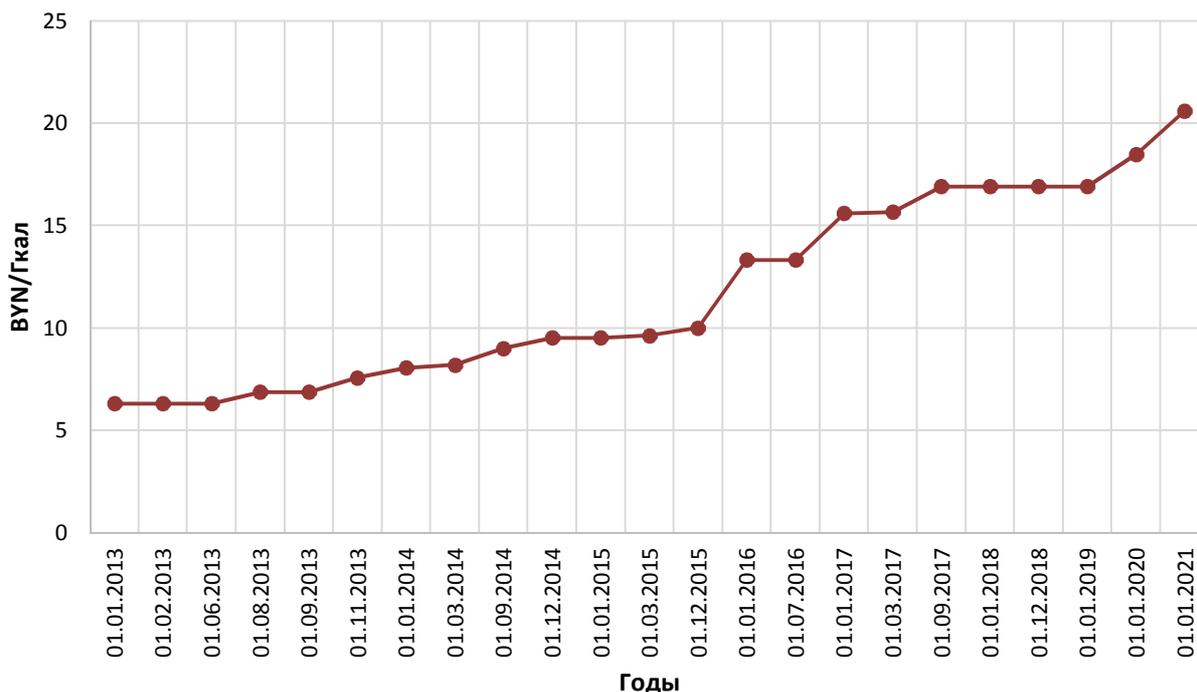


Рис. 3. Динамика тарифов на тепловую энергию в Республике Беларусь в 2013-2021 гг., руб./Гкал [9]

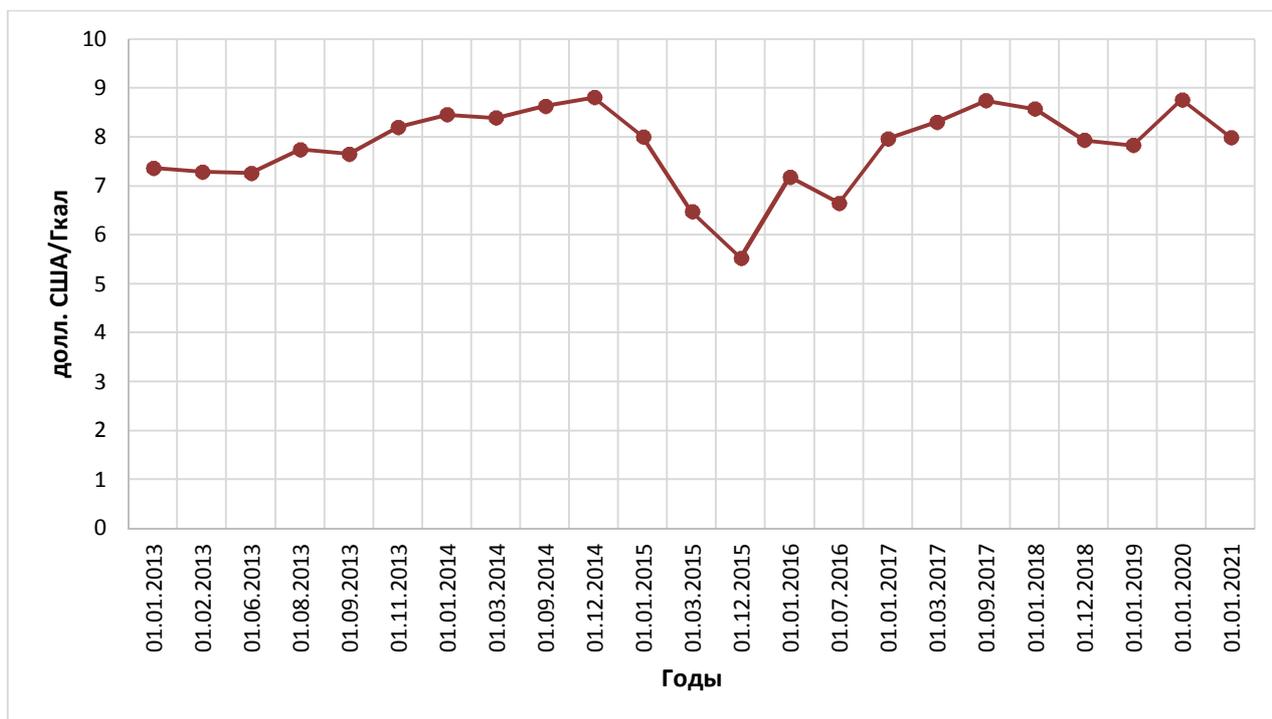


Рис. 4. Динамика тарифов на тепловую энергию в Республике Беларусь в 2013-2020 гг., долл. США/Гкал [9]

Анализируя рис. 4, можно сделать вывод, что начиная с января 2013 г. по настоящее время тариф на тепловую энергию вырос на 0,63 долл. США/Гкал, или в 1,09 раза.

Сравнительный анализ рис. 1-4 позволяет сделать вывод, что в исследуемый период темпы роста одноставочного тарифа на электрическую энергию опережа-

ли темпы роста тарифа на тепловую энергию в 1,97 раза, что свидетельствует о том, что существующая в настоящее время тарифная политика на тепловую и электрическую энергию недостаточно способствует стимулированию повышения доли электрической энергии в балансе энергоснабжения зданий.

Опережение темпов роста тарифов на электроэнергию по сравнению с тарифами на тепловую энергию обусловлено ликвидацией перекрестного субсидирования населения по оплате электрической энергии. По данным ГПО «Белэнерго», в 2017 г. население Республики Беларусь возмещало затраты по тепловой энергии на уровне 21,4 %, а на электроэнергию – 80,2 %. А уже с января 2018 г. тарифами обеспечивается 100 %-й уровень возмещения затрат по всем услугам ЖКХ, кроме тепловой энергии.

В связи с этим необходимым является разработка направлений совершенствования тарифной политики, которая будет способствовать стимулированию повышения доли электрической энергии в балансе энергоснабжения зданий. В качестве таких направлений можно порекомендовать следующие.

### **1. Установление тарифа для населения на электрическую энергию, используемую для отопления и горячего водоснабжения жилого дома, равнозначного тарифу на тепловую энергию для этих целей.**

Произведем расчет уровня тарифа для населения на электрическую энергию, используемую для нужд отопления и горячего водоснабжения, равнозначного тарифу на тепловую энергию для этих целей.

*Исходные данные.* Тариф на электроэнергию, обеспечивающий полное возмещение экономически обоснованных затрат (в том числе в части использования электрической энергии для нужд отопления и горячего водоснабжения), – 0,23 руб. за 1 кВт·ч.

Тариф на тепловую энергию для нужд отопления и горячего водоснабжения, обеспечивающий полное возмещение экономически обоснованных затрат, – 107,31 руб. за 1 Гкал.

Субсидируемый тариф на тепловую энергию для населения – 20,6216 руб. за 1 Гкал.

Доля возмещения населением затрат по тепловой энергии – 20 % [10].

Определяем стоимость 1 Гкал тепловой энергии, выработанной с использованием электроэнергии, в случае оплаты электроэнергии по полному тарифу для населения (1 Гкал = 1163 кВт·ч):

$1163 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \cdot 0,23 \text{ руб. за кВт}\cdot\text{ч} = 267,49 \text{ руб. за 1 Гкал.}$

По сравнению с действующим в настоящее время полным тарифом на теплоэнергию для населения стоимость 1 Гкал в случае выработки ее с использованием электроэнергии в 2,5 раза выше.

Определяем стоимость электроэнергии для обеспечения равнозначности затрат при использовании действующего тарифа на тепловую энергию для целей отопления и ГВС (20,6216 руб. за 1 Гкал):

$20,6216 / 1,163 / 10^3 = 0,018 \text{ руб. за кВт}\cdot\text{ч}$   
(0,7 цента США/кВт·ч).

Рассчитаем стоимость 1 кВт·ч электроэнергии для выработки тепловой энергии для нужд населения, которая обеспечивает равную себестоимость тепловой энергии, вырабатываемой с использованием природного газа, по стоимости газа, используемого организациями ЖКХ для производства тепловой энергии для нужд населения.

(Удельный расход топлива на выработку тепловой энергии – 166,9 кг у.т. на 1 Гкал) [14].

Стоимость газа для организаций системы Министерства жилищно-коммунального хозяйства, оказывающих жилищно-коммунальные услуги, в части использования природного газа для производства тепловой энергии для нужд населения составляет 410,30 руб. за 1000 м<sup>3</sup> при курсе белорусского рубля к доллару США 2,5789:1 [11, 12].

Стоимость 1 т у.т. в газовом эквиваленте составит

$410,30 \text{ рубля} : 1,15 = 356,78 \text{ руб./т у.т.},$   
где 1,15 – переводной коэффициент природного газа в т у.т.

Тогда затраты на производство 1 Гкал тепловой энергии по топливной составляющей составят:

$$C_{\text{Гкал}} = (166,9 \text{ кг у.т.} \times 356,78 \text{ руб.}) / 10^3 = 59,55 \text{ руб./Гкал.}$$

Тариф на электрическую энергию для выработки 1 Гкал тепловой энергии на электростанциях системы ЖКХ, без увеличения стоимости топливной составляющей, должен составить (при курсе белорусского рубля к доллару 2,5789:1):

$$59,55 \text{ руб.} / 1,163 / 10^3 = 0,0512 \text{ руб./кВт}\cdot\text{ч,}$$

что эквивалентно 2,0 цента США/кВт·ч.

При тарифе на электрическую энергию для электростанций ЖКХ, обеспечивающих тепловой энергией население на уровне 0,07995 руб./кВт·ч (3,1 цента США/кВт·ч) в ночные часы минимумов, себестоимость тепловой энергии по топливной составляющей по отношению к газовой котельной возрастет на 36 % ( $2,0/3,1 \cdot 100=64\%$ ;  $100-64=36\%$ ).

Топливная составляющая в 1 Гкал при тарифе 3,1 цента США за 1 кВт·ч будет на уровне 80,99 руб./Гкал вместо фактической 59,55 руб./Гкал.

Следует отметить, что уровень возмещения населением затрат по тепловой энергии в части, выработанной с использованием электростанций, снизится до 8 %:

$$20,6216 \text{ руб.} / 267,49 \cdot 100 = 8\%.$$

Таким образом, уровень тарифа на электрическую энергию, используемую для отопления и горячего водоснабжения жилых домов, равнозначный тарифу на тепловую энергию для этих же целей, составляет 0,018 руб. за кВт·ч (0,7 цента США/кВт·ч).

В настоящее время основными нормативными документами в области регулирования тарифов на тепловую и электрическую энергию для населения являются:

– Инструкция по определению групп потребителей электрической и тепловой энергии, по которым могут дифференцироваться тарифы на электрическую и тепловую энергию;

– Положение о порядке формирования тарифов (цен) на жилищно-коммунальные услуги для населения и юридических лиц.

Принятие данного предложения потребует внесения в эти нормативные документы соответствующих изменений.

По состоянию на 01.01.2021 г. для населения установлены три вида тарифов на электрическую энергию для нужд отопления, отопления и горячего водоснабжения [9].

Дифференцированный по двум временным периодам тариф на электрическую энергию для нужд отопления и горячего водоснабжения с присоединенной суммарной мощностью электронагревательного оборудования более 5 кВт составляет:

в часы минимальных нагрузок (с 23.00 до 6.00) – 0,1220 руб./кВт·ч (4,7 цента США/кВт·ч);

остальное время суток – 0,2266 руб./кВт·ч (8,8 цента США/кВт·ч).

Тариф на электрическую энергию для нужд отопления и горячего водоснабжения в жилых домах (квартирах), не оборудованных в установленном порядке системами централизованного тепло- и газоснабжения, при наличии отдельного (дополнительного) прибора индивидуального учета расхода электрической энергии для нужд отопления и горячего водоснабжения составляет:

с 1 января по 31 мая 2021 года включительно – 0,0374 руб./кВт·ч (1,4 цента США/кВт·ч);

с 1 июня по 31 декабря 2021 года включительно – 0,0398 руб./кВт·ч (1,5 цента США/кВт·ч).

Тариф на электрическую энергию при условии ее использования в том числе для нужд отопления и горячего водоснабжения в жилых домах (квартирах), не оборудованных в установленном порядке системами централизованного тепло- и газоснабжения и оборудованных в установленном порядке электрическими плитами, при отсутствии отдельного (дополнительного) прибора индивидуального учета расхода электрической энергии для нужд отопления и горячего водоснабжения составляет:

с 1 января по 31 мая 2021 года включительно:

одноставочный тариф – 0,0894 руб./кВт·ч (3,5 цента США/кВт·ч);

тариф, дифференцированный по двум временным периодам:

минимальных нагрузок (с 23.00 до 6.00) – 0,0626 руб./кВт·ч (2,4 цента США/кВт·ч);

остальное время суток – 0,0809 руб./кВт·ч (3,1 цента США/кВт·ч).

С 1 июня по 31 декабря 2020 года включительно:

одноставочный тариф – 0,0909 руб./кВт·ч (3,5 цента США/кВт·ч);

тариф, дифференцированный по двум временным периодам:

минимальных нагрузок (с 23.00 до 6.00) – 0,0636 руб./кВт·ч (2,5 цента США/кВт·ч);

остальное время суток – 0,1182 руб./кВт·ч (4,6 цента США/кВт·ч).

**2. Внедрение более глубокой дифференциации во времени тарифообразования на электрическую энергию в целях выравнивания графика нагрузки.**

Начиная с 01.07.2019 г. в Республике Беларусь потребление электроэнергии населением для бытовых целей рассчитывается по трем временным периодам: в период минимальных нагрузок (с 23.00 до 6.00) с коэффициентом 0,6 к одноставочному тарифу, в период максимальных нагрузок (с 17.00 до 23.00) – с коэффициентом 1,8, в оставшийся временной промежуток (с 6.00 до 17.00) – с коэффициентом 0,7.

Введение дополнительной дифференциации направлено на сглаживание вечернего максимума нагрузки энергосистемы и стимулирование населения к переносу электропотребления на ночное время суток. В результате, население имеет возможность выбрать для расчетов за потребленную электроэнергию удобный для своего домовладения тарифный план и снизить платежи за электроэнергию (см. таблицу).

Тарифы (без НДС) на электрическую энергию, дифференцированные по трем временным зонам, руб./кВт·ч (центов США/кВт·ч) [9]

Группа потребителей	Период минимальных нагрузок (с 23.00 до 6.00 ч)	Период максимальных нагрузок (с 17.00 до 23.00 ч)	Остальное время суток
Тариф на электрическую энергию, обеспечивающий полное возмещение экономически обоснованных затрат	0,1380 (5,4)	0,4140 (16,1)	0,1610 (6,2)
Электрическая энергия в жилых домах (квартирах), оборудованных в установленном порядке электрическими плитами	0,1067 (4,1)	0,3200 (12,4)	0,1245 (4,8)
Электрическая энергия в жилых домах (квартирах), не оборудованных в установленном порядке электрическими плитами	0,1255 (4,9)	0,3766 (14,6)	0,1464 (5,7)
Электрическая энергия для нужд отопления и горячего водоснабжения с присоединенной (суммарной) мощностью электронагревательного оборудования более 5 кВт	0,1220 (4,7)	–	0,2266 (8,8)

Как видно из таблицы, разница в тарифах в пиковые часы и в остальное время колеблется примерно в 3 раза. Вместе с тем широкого распространения данное использование дифференцированных по времени тарифов не получило. Это связано в первую очередь со слабой информированностью населения о целесообразности использования дифференцированных тарифов, а также с недостаточной оснащенностью потребителей электронными счетчиками учета электроэнергии.

Применение дифференцированных тарифов позволит в 2,35-2,59 раза снизить максимальный диапазон регулирования нагрузки и увеличить коэффициент неравномерности графика до 0,814 при росте затрат потребителей электрической энергии лишь на 1,26-2,67%. [16]

В Германии такие схемы обычно используются для потребителей, использующих электроэнергию для нужд отопления

и горячего водоснабжения. Эксперимент с повышением цен на электроэнергию в часы пиковых нагрузок на 30% в сравнении с ценой в непиковые часы, который был проведен в США для бытовых и небольших коммерческих потребителей, привел к снижению максимальной электрической нагрузки в пиковой временной зоне на 5%, а следовательно, к снижению себестоимости производства электрической энергии в пиковые часы [13].

На сегодняшний день работа по совершенствованию приборного учета электрической энергии в Республике Беларусь ведется по двум направлениям [15]:

- замена индукционных приборов учета электроэнергии на электронные приборы учета;
- внедрение автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии – АСКУЭ.

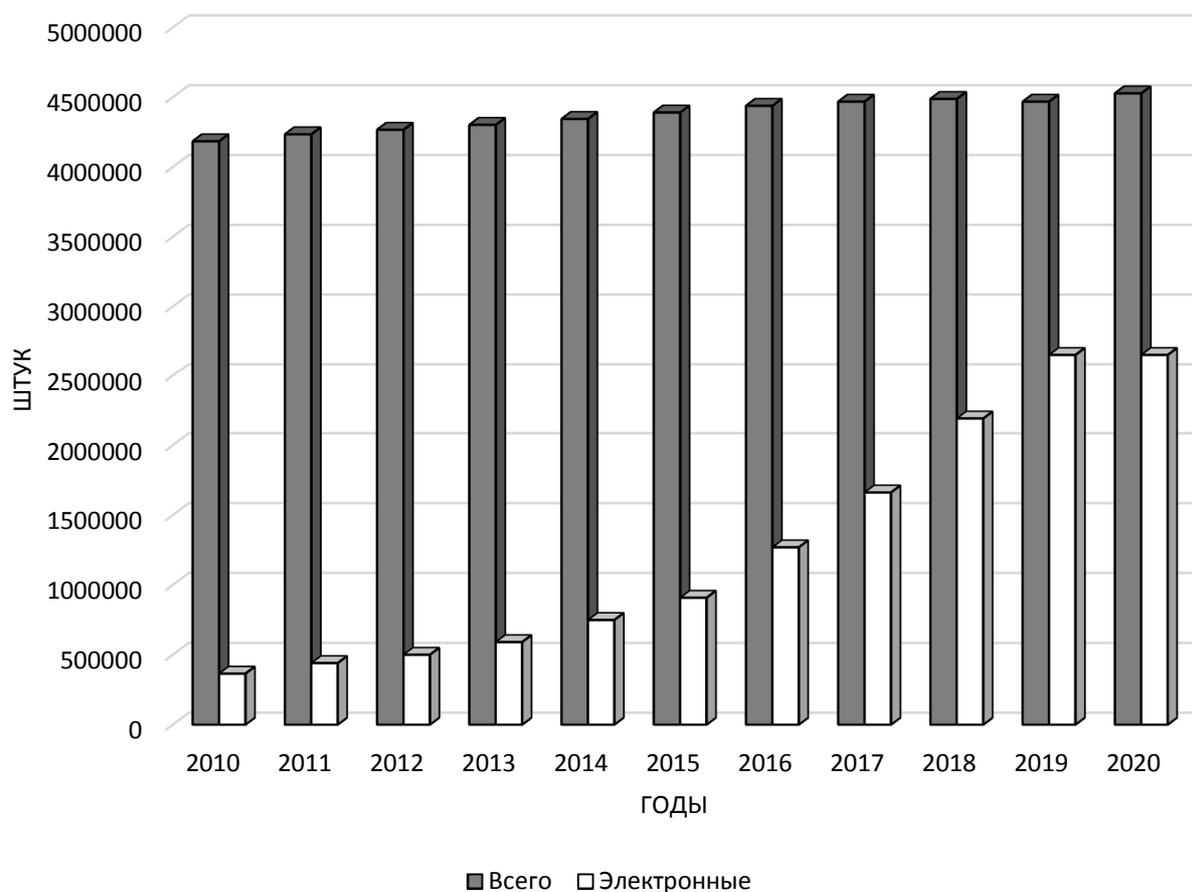
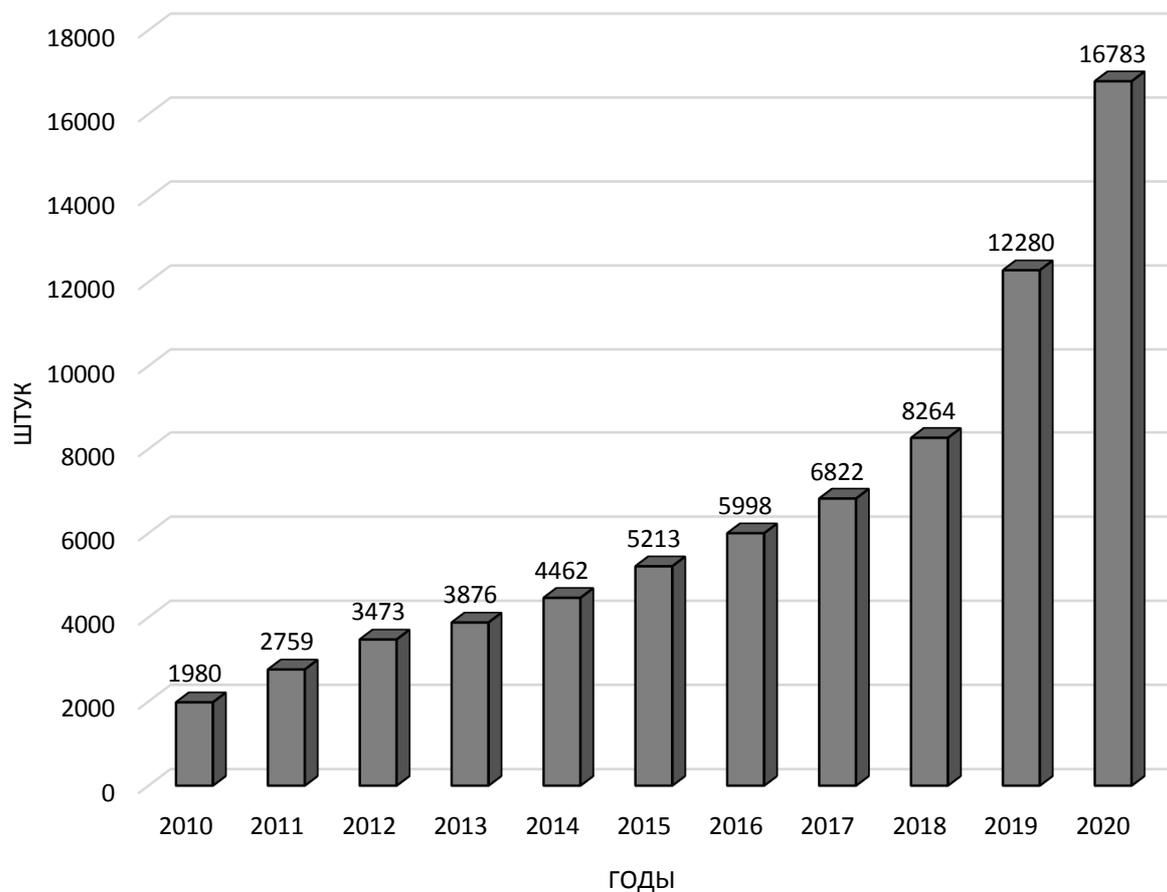


Рис. 5. Рост доли парка электронных однофазных счетчиков электрической энергии в Республике Беларусь (по состоянию на конец года) [15]



**Рис. 6.** Динамика внедрения АСКУЭ-быт в многоквартирных жилых домах в Республике Беларусь (по состоянию на конец года) [15]

Анализ рис. 5 и 6 показывает, что доля однофазных электронных счетчиков в общем парке приборов учета электроэнергии в период с 2010 года увеличилась в 7,3 раза (с 8,7 % в 2010 году до 58,6 % в 2020 году), количество АСКУЭ-быт в многоквартирных домах за период с 2010 по 2020 годы увеличилось в 8,5 раза. Всё это позволяет сделать вывод о высоких темпах развития систем приборного учета электрической энергии в Республике Беларусь.

### 3. Установление сбалансированных тарифов на все виды энергетических ресурсов.

Сохранение существующих тарифов для потребителей природного газа не будет способствовать росту электропотребления в балансе энергоснабжения зданий и, как следствие, снижению газовой зависимости Республики Беларусь.

При сравнении действующих тарифов на электрическую энергию с существующими розничными тарифами на природный газ можно сделать вывод, что они значительно (в разы) уступают соответствующим тарифам на электрическую энергию. Рекомендуется средние тарифы на природный газ привести в соответствии со средними тарифами на электрическую энергию таким образом, чтобы без увеличения цен на электрическую энергию, производимую из природного газа, тарифы на природный газ для категорий потребителей, использующих его вместо электроэнергии, соответствовали тарифам на электрическую энергию.

Приведение в соответствие тарифов на электрическую и тепловую энергию может снизить потребление тепловой энергии в Республике Беларусь и соответственно финансовую нагрузку, которую несет ОЭС по обслуживанию теплотрасс.

### 4. Поэтапная ликвидация перекрестного субсидирования всех уровней.

В настоящее время в Республике Беларусь имеет место перекрестное субсидирование расходов на электрическую энергию определенными категориями потребителей с одной стороны, и перекрестное субсидирование расходов на тепловую и электрическую энергию с другой стороны. В частности, если при формировании тарифов на электрическую энергию предусматривается возмещение населением 80 % затрат ОЭС, то тарифы на тепловую энергию для населения покрывают лишь около 20 % затрат на ее производство и распределение. Этот факт свидетельствует о стимулировании в настоящее время использования тепловой энергии для энергоснабжения зданий.

Мероприятия в области совершенствования тарифной политики должны быть дифференцированы во времени и предусматривать последовательность их реализации. Этапы должны соответствовать наиболее значимым планируемыми изменениям в функционировании ОЭС и национальной экономики в целом, таким как создание общего электроэнергетического рынка ЕАЭС, выход на проектную мощность БелАЭС, который по нынешним прогнозам не предусматривает повышения тарифов на электрическую энергию [17] и др.

В частности, можно выделить три этапа совершенствования тарифной политики.

1 этап (2019-2020 гг.) предусматривал введение дифференцированных по времени тарифов на электрическую энергию и уста-

новление специальных тарифов для реализации пилотных проектов (например, для жителей электрифицированных домов).

2 этап (2021-2025 гг.) должен предусматривать введение сбалансированных тарифов на электрическую и тепловую энергию, а также установление специальных тарифов для предприятий внедряющих мероприятия по повышению электропотребления (например, для БЖД в части электрификации железнодорожного транспорта).

3 этап (2026-2030 гг.) должен предусматривать введение сбалансированных тарифов на все виды энергетических ресурсов (включая природный газ), используемых для энергоснабжения зданий.

### Выводы

Перечисленные механизмы должны быть положены в основу принципов тарифообразования и формирования тарифной политики на энергетические ресурсы, что позволит стимулировать повышение доли электрической энергии в балансе энергоснабжения зданий, а также приведет к повышению конкурентоспособности белорусских производителей на внешних рынках, увеличению уровня устойчивого энергетического развития и повышению качества жизни населения Республики Беларусь.

Приведение в соответствие тарифов на электрическую и тепловую энергию может снизить потребление тепловой энергии в Республике Беларусь и соответственно финансовую нагрузку, которую несет ОЭС по обслуживанию теплотрасс.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Айзенберг Н.И.** Теоретические основы регулирования цен и тарифов в электроэнергетике / Н.И. Айзенберг // Сборник научных трудов / Российская акад. наук, Сибирское отд-ние, Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН; отв ред. В.И. Зоркальцев, А.Ю. Филатов. Новосибирск, 2009. С. 6-28.

2. **Зорина Т.Г.** Формирование комплексной тарифной политики на энергоре-

сурсы в Беларуси / Т.Г. Зорина, С.Г. Прусов // Белорусский экономический журнал. 2019. № 4. С. 86-99.

3. Формирование современной тарифной политики на электрическую и тепловую энергию в Республике Беларусь / Л.П. Падалко, А.М. Заборовский // Экономический бюллетень Научно-исследовательского экономического института Министерства экономики Республики

Беларусь / гл. ред. Я.М. Александрович. 27/04/2008. № 4. С. 41-53. На рус. яз.

4. **Крылова Е.Г.** Формирование тарифной политики предприятий энергетики Республики Беларусь / Е.Г. Крылова, А.А. Булка // Менеджмент и маркетинг: опыт и проблемы: сб. науч. трудов / [под общ. ред. И.Л. Акулича]; Белорус. гос. экон. ун-т [и др.]. Минск: А.Н. Вараксин, 2017. С. 198-201.

5. **Хуберт Ф.** Перекрестное субсидирование тарифов в электроэнергетической промышленности России не так плохо, как его репутация / Ф. Хуберт // Экономический журнал Высшей школы экономики. 2002. № 6 (3). С. 343-353.

6. Перекрестное субсидирование в электроэнергетике: проблемы и пути решения / А.В. Трачук, Н.В. Линдер, В.А. Зубакин и др. СПб.: Реальная экономика, 2017. 121 с.

7. **Золотова И.** Перекрестное субсидирование в электроэнергетике: эмпирический анализ, оценка эффективности собственной генерации / И. Золотова // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2017. № (3). С. 70-77.

8. Действующие тарифы на электроэнергию в Беларуси [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.energosbyt.by/tariffs.php/>. Дата доступа: 01.04.2021.

9. Действующие тарифы в Беларуси [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.tarify.by/тарифы-на-тепло-и-электричество/>. Дата доступа: 01.04.2021.

10. Официальный сайт РУП «Минскэнерго», филиал «Энергосбыт». URL: <http://www.energosbyt.by>. Дата доступа: 01.04.2021.

11. Официальный сайт Министерства энергетики Республики Беларусь. URL:

<https://minenergo.gov.by/wp-content/uploads/gaz-2020-jur-lica.pdf>. Дата доступа: 01.04.2021.

12. Постановление Министерства антимонопольного регулирования и торговли Республики Беларусь от 30.01.2020. № 8. URL: [https://pravo.by/upload/docs/op/W22136300\\_1611954000.pdf](https://pravo.by/upload/docs/op/W22136300_1611954000.pdf). Дата доступа: 01.04.2021.

13. **Du Bois, Dennis.** Time of use electricity billing: how puget sound energy reduced peak power demands (case study), energy priorities, 14 February 2006 / Dennis Du Bois. URL: [http://energypriorities.com/entries/2006/02/pse\\_tou\\_amr\\_case.php/](http://energypriorities.com/entries/2006/02/pse_tou_amr_case.php/)

14. Официальный сайт Государственного производственного объединения электроэнергетики «Белэнерго». URL: <https://energo.by/content/deyatelnost-obedineniya/proizvodstvo-teplovoy-energii/>. Дата доступа: 01.04.2021.

15. Официальный сайт Государственного производственного объединения электроэнергетики «Белэнерго». URL: <https://energo.by/content/deyatelnost-obedineniya/sbytovaya-deyatelnost/sovershenstvovanie-ucheta-otpuskaemoj-potrebitelyam-elektricheskoy-energii/>. Дата доступа: 01.04.2021.

16. **Зорина Т.Г.** Внедрение дифференцированных тарифов на электрическую энергию по временным периодам / Т.Г. Зорина // Гуманитар.-экан. весн. 2015. № 2. С. 78-85.

17. Минэнерго рассказало об изменении тарифов после запуска БелАЭС [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.belta.by/economics/view/minenergo-rasskazalo-ob-izmenenii-tarifov-posle-zapuska-belaes-343999-2019/>. Дата доступа: 01.04.2021.

**Александрович Сергей Александрович** – магистр технических наук, научный сотрудник лаборатории «Энергобезопасность» Института энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

**Siarhei A. Aliaksandrovich** – M.Sc. (Eng.), Research Fellow, Laboratory of Energy Security, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

**Зорина Татьяна Геннадьевна** – доктор экономических наук, доцент, заведующий сектором «Экономика энергетики» Института энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

**Tatsiana G. Zorina** – Dr.Sc. (Economics), Associate Professor, Head: Energy Economics Division, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

*Статья поступила в редакцию 08.07.21, принята к опубликованию 12.08.21*

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Приглашаем к сотрудничеству ученых, преподавателей, сотрудников научных коллективов кафедр и лабораторий вузов, научно-исследовательских институтов, аспирантов, студентов, руководителей промышленных предприятий, разработчиков новой продукции, инвесторов, представителей органов власти.

По вопросам публикации статей в научно-техническом журнале «Вопросы электротехнологии» обращаться по телефону:

8 (951) 880-19-13 – Юдина Виолетта Олеговна (ответственный секретарь).

Просьба направлять публикации по адресу:

Россия, 410008, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ком. 1/133а, гл. редактору журнала «Вопросы электротехнологии» Калгановой С.Г. и по электронной почте [eltech@sstu.ru](mailto:eltech@sstu.ru)

### Требования к оформлению публикаций

Печатный вариант публикации предоставляется объемом до 10 стр. формата А4; поля: сверху и снизу по 25 мм, справа и слева по 20 мм, через одинарный интервал, шрифт Times New Roman 12, абзацный отступ 0,63 см, формат файла \*.doc, редактор Microsoft Word 2003.

Иллюстрации (рисунки, графики) выполняются в формате .jpg, располагаются в тексте статьи и должны иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул **Microsoft Equation 3.0** и иметь нумерацию.

Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т.е., и т.д., и т.п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

**ОБЯЗАТЕЛЬНО** наличие индекса УДК и списка использованных источников, оформленного по ГОСТ 7.1-2003 и включающего: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

Также предоставляется информация об авторах (**ФИО полностью, почетные звания, ученая степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, e-mail**), название статьи, аннотация и ключевые слова. Данная информация дублируется на **английском языке**.

Специалисты в технических и естественно-научных отраслях к публикации **ОБЯЗАТЕЛЬНО** прилагают экспертное заключение.

Публикации принимаются в течение всего года.

Публикации, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

За дополнительной информацией обращайтесь на сайт журнала «Вопросы электротехнологии» [www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii](http://www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii)

Редактор Л.А. Скворцова  
Компьютерная верстка Ю.Л. Жупиловой  
Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой

---

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77  
Телефон: (8452) 99-87-63  
E-mail: eltech@sstu.ru

---

Подписано в печать 24.09.2021  
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.  
Усл. печ. л. 13,0      Уч. изд. л. 5,4  
Тираж 500 экз.      Заказ 62      Цена свободная  
Отпечатано в Издательстве СГТУ, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.  
E-mail: izdat@sstu.ru

Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ  
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU  
**Подписной индекс 70841** (каталог «Газеты. Журналы» на 1-е полугодие 2022 г.)  
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

---

Editor L.A. Skvortsova  
Computer-assisted layout by Yu.L. Zhupilova  
Translation into English by A.H. Askarova

---

Address: 77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia  
Tel.: (8452) 99-87-63  
E-mail: eltech@sstu.ru

---

Print date: 24.09.2021  
Paper size: 60×84 1/8.      Offset-Print  
Conventional printed sheet 13,0      Publication base sheet 5,4  
Circulation: 500 printed copies.      Order 62      Subscription and individual copies: open rates  
Published by SSTU Publishing, 410054 Saratov, 77 Politekhnikeskaya Str.  
Online at [www.eLIBRARY.RU](http://www.eLIBRARY.RU)  
The certificate of media source registration: *PI No. FS77-54621 dated 1 July 2013*

---