

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 1

Нижний Новгород 2025

УДК 621.3

ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2025. № 1 (29). – 123 с.

Выходит 1 раз в квартал

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

Главный редактор

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

зам. гл. редактора

Андрей Борисович Дарьенков д-р техн. наук, доцент
Елена Николаевна Соснина д-р техн. наук, профессор

отв. секретарь

Андрей Владимирович Шалухо канд. техн. наук

отв. редактор

Валерия Игоревна Казакова канд. филос. наук, доцент

выпускающий редактор

Иван Алексеевич Липужин канд. техн. наук

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

| | |
|--------------------------------|----------------------------|
| Даурен Садыкович Ахметбаев | д-р техн. наук (Казахстан) |
| Геннадий Яковлевич Вагин | д-р техн. наук, профессор |
| Леонид Абрамович Герман | д-р техн. наук, профессор |
| Валерий Геннадьевич Гольдштейн | д-р техн. наук, профессор |
| Игорь Васильевич Гуляев | д-р техн. наук, профессор |
| Павел Владимирович Илюшин | д-р техн. наук |
| Александр Леонидович Куликов | д-р техн. наук, профессор |
| Виктор Николаевич Мешеряков | д-р техн. наук, профессор |
| Александр Сергеевич Плехов | канд. техн. наук, доцент |
| Александр Юрьевич Смирнов | д-р техн. наук, доцент |
| Владимир Георгиевич Титов | д-р техн. наук, профессор |
| Олег Станиславович Хватов | д-р техн. наук, профессор |
| Юрий Иванович Хохлов | д-р техн. наук, профессор |
| Александр Иванович Чивенков | д-р техн. наук, профессор |

Учредитель и издатель:

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»
(603155, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

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

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

ISSN 2658-6754

УДК 621.3

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----------|
| ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ | 4 |
| Ваняев В.В., Соколов В.В., Дарьенков А.Б., Кукушкин А.В., Бердников И.Е., Слuzов А.П., Храмов А.Е. Модульная система электропитания глубоководных беспилотных аппаратов..... | 4 |
| Куликов А.Л., Осокин В.Л., Леваков Д.А. Сравнительный анализ и перспективы развития междисциплинарных методов определения мест повреждений контактной сети. Часть 1..... | 16 |
| Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Карпов И.П. Формирование схемы замещения системы электроснабжения тяговых подстанций.... | 36 |
| Лоскутов А.А. Особенности распознавания режимов функционирования систем электроснабжения промышленных потребителей с объектами распределенной генерации..... | 50 |
| Попов С.В., Бурмакин О.А., Малышев Ю.С. Рекомендации по определению мощности согласующего трансформатора для питания электропривода якорно-швартового механизма..... | 70 |
| Скороход Ю.Ю. Анализ влияния синхронного и асинхронного способа управления на качество потребляемого тока преобразователя. | 81 |
| ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА | 93 |
| Рогожников А.О., Белов О.А. Универсальный тренажер отработки практических навыков операторов судовой электростанции с использованием программной симуляции..... | 93 |
| Меньшов Е.Н. Представление вектора Пойнтинга через электрические характеристики электротехнических систем. Часть 3. Вихревая составляющая вектора Пойнтинга..... | 105 |

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.314.1:629.584

EDN MFEQAW

**МОДУЛЬНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ
ГЛУБОКОВОДНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ****В.В. Ваняев**ORCID: 0000-0001-9597-3865 e-mail: vanyaev.w@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***В.В. Соколов**ORCID: 0000-0002-1743-0256 e-mail: victorsokolov52@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.Б. Дарьенков**ORCID: 0000-0001-9941-4550 e-mail: darenkov@nntu.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.В. Кукушкин**e-mail: info.vid@yandex.ruООО «КОМПАНИЯ «ВИД»
*Нижний Новгород, Россия***И.Е. Бердников**ORCID: 0000-0003-1652-5453 e-mail: berdnirdnikov@gmail.comАО «Автомобильный завод «УРАЛ»
*Нижний Новгород, Россия***А.П. Слузов**ORCID: 0000-0002-4864-3983 e-mail: anton.sluzov@yandex.ruАО «Автомобильный завод «УРАЛ»
*Нижний Новгород, Россия***А.Е. Храмов**ORCID: 0000-0002-1743-0256 e-mail: anton.khramov.nnstu2023@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлен вариант модульной структуры силовых цепей системы электропитания глубоководных беспилотных аппаратов, построенной на базе транзисторного преобразователя с последовательным полумостовым резонансным инвертором. Приведены результаты имитационного моделирования нестационарных процессов в модуле. Предложено схемное решение силовой части модуля с мягкой коммутацией транзисторов.

Ключевые слова: система электропитания, беспилотный аппарат, модуль, резонансный инвертор, нестационарные процессы.

Для цитирования: Ваняев В.В., Соколов В.В., Дарьенков А.Б., Кукушкин А.В., Бердников И.Е., Слuzов А.П., Храмов А.Е. Модульная система электропитания глубоководных беспилотных аппаратов // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 1. С. 4-15. EDN MFEQAW

MODULAR POWER SUPPLY SYSTEM FOR DEEP-SEA UNMANNED VEHICLES

V.V. Vanyaev

ORCID: **0000-0001-9597-3865** e-mail: **vanyaev.w@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

V.V. Sokolov

ORCID: **0000-0002-1743-0256** e-mail: **victorsokolov52@yandex.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.B. Dar`enkov

ORCID: **0000-0001-9941-4550** e-mail: **darenkov@nntu.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Kukushkin

e-mail: **info.vid@yandex.ru**
LLC «VID» Company
Nizhny Novgorod, Russia

I.E. Berdnikov

ORCID: **0000-0003-1652-5453** e-mail: **berdnirdnkov@gmail.com**
JSC Automobile Plant URAL
Nizhny Novgorod, Russia

A.P. Sluzov

ORCID: **0000-0002-4864-3983** e-mail: **anton.sluzov@yandex.ru**
JSC Automobile Plant URAL
Nizhny Novgorod, Russia

A.E. Khramov

ORCID: 0000-0002-1743-0256 e-mail: anton.khramov.nnstu2023@mail.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Proposed a variant of the modular structure of the power circuits of the power supply system of deep-sea unmanned vehicles, built on the basis of a transistor converter with a series half-bridge resonant inverter. The results of simulation modeling of non-stationary processes in the module are presented. A circuit solution for the power section of the module with soft switching of transistors is proposed.

Keywords: power supply system, unmanned vehicle, module, resonant inverter, non-stationary processes.

For citation: V.V. Vanyaev, V.V. Sokolov, A.B. Dar`enkov, A.V. Kukushkin, I.E. Berdnikov, A.P. Sluzov and A.E. Khramov, "Modular power supply system for deep-sea unmanned vehicles", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 4-15, 2025. EDN MFEQAW

I. Введение

Электропитание подводных потребителей электрической энергии, к которым, в частности, относятся глубоководные беспилотные аппараты, предназначенные для глубоководных исследований [1], геологоразведки [2] и добычи полезных ископаемых [3], осуществляется как на постоянном, так и переменном напряжении [4]. Системы электропитания (СЭ) с передачей энергии постоянного тока имеют ряд достоинств, обусловленных отсутствием реактивной составляющей напряжения и тока в питающем кабелетросе, соединяющем надводную и подводную часть СЭ, принципиальной возможностью снижения ее массы и габаритов при соответствующем выборе рабочей частоты преобразовательной части СЭ.

II. Структура системы электропитания глубоководного аппарата

Одной из основных трудностей создания таких систем является преобразование высокого напряжения в подводной части (ПЧ) системы при напряжении питающего кабеля, достигающего значения 2400 В и более [1, 4].

Эта задача решается путем последовательного соединения по входным и параллельно по выходным цепям нескольких ($N = 3 \dots 4$) модулей, построенных на базе транзисторных однофазных автономных инверторов (АИ) [2]. Такой подход позволяет использовать низковольтную полупроводниковую элементную базу и возможность наращивания выходной мощности СЭ путем увеличения числа ее модулей [3].

На рис. 1 приведена структура силовых цепей такой СЭ, в состав которой входят:

- а) надводная часть (НЧ), содержащая:
 - первичный источник электропитания (на схеме не показан);

- входной выпрямитель (В) со сглаживающим L - C фильтром (Ф);
 - несколько (M) идентичных DC/DC модулей, выходы которых последовательно соединены между собой и подключены к входу подводного кабеля-троса (КТ);
 - вольтодобавочный модуль (ВДМ);
 - система управления и контроля состояния узлов НЧ (СУНЧ);
 - датчик тока (ДТ) кабеля-троса и датчик напряжения (ДН) на выходе НЧ;
- б) кабель-трос (КТ);
- в) подводная часть (ПЧ), содержащая:
- несколько (N) идентичных DC/DC модулей, входы которых шунтированы конденсаторами фильтра $C1.1 \dots C1.N$ одинаковой емкости, последовательно соединены и подключены к подводному выходу КТ, а параллельно соединенные выходы подключены к нагрузке;
 - система управления модулями ПЧ (СУПЧ).

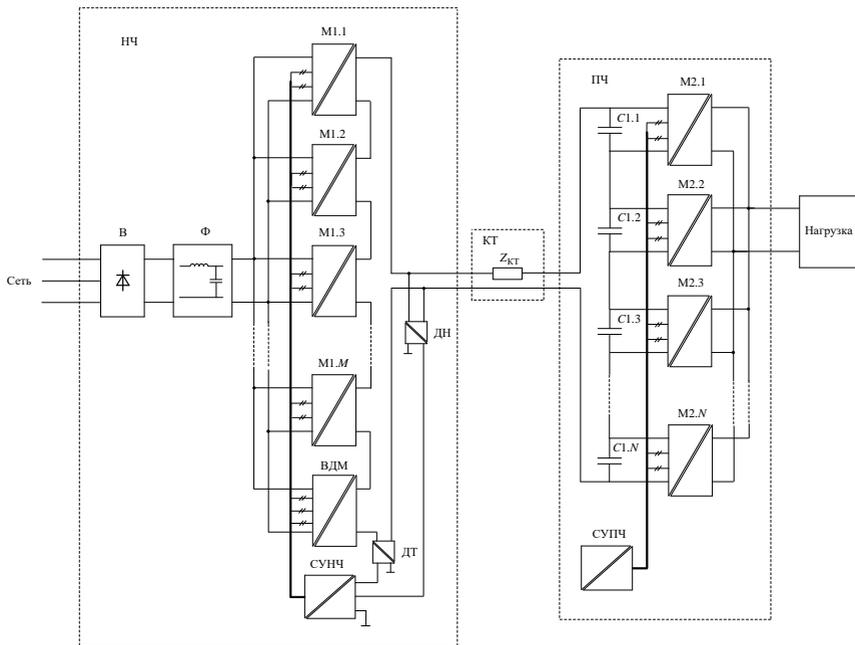


Рис. 1. Структура силовых цепей модульной СЭ

Fig. 1. Structure of power circuits of modular power supply system

Входной выпрямитель обеспечивает питание группы надводной части DC/DC модулей [5] и при рациональном выборе параметров сглаживающего L - C фильтра [6] позволяет получить в режиме номинальной нагрузки значение коэффициента k_m мощности СЭ в пределах $k_m = 0,94 \div 0,95$.

III. DC/DC модуль на основе резонансного инвертора

DC/DC модули выполнены на базе последовательных резонансных инверторов (ПИ) с разделительными трансформаторами, обеспечивающими гальваническую развязку и согласование напряжений электрооборудования бортовой сети судна и силовых цепей СЭ.

Несомненными и важными достоинствами такой структуры являются:

- простая и надежная схема силового контура, что подтверждается многолетней безаварийной эксплуатацией таких устройств в системах зарядки емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) [6];
- достаточно жесткая внешняя характеристика в области рабочих нагрузок [7];
- малые коммутационные потери и пониженный уровень помех;
- использование индуктивностей рассеяния обмоток трансформатора в качестве элемента силового резонансного контура;
- принципиальная способность функционирования в режиме перегрузки СЭ.

Наиболее простым схемотехническим вариантом одного модуля подобной структуры, по мнению авторов, является DC/DC преобразователь на основе последовательного полумостового резонансного инвертора с одним конденсатором резонансного L - C контура [7], силовая часть которого содержит минимальное число компонентов (рис. 2).

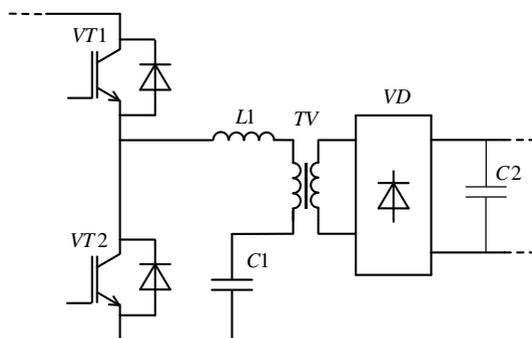


Рис. 2. Схема силовой части модуля ПЧ СЭ

Fig. 2. Power section diagram of the module

В качестве важных достоинств силовой части модуля (рис. 2) следует отметить стабильность протекания электромагнитных процессов в нем без экстремальных значений напряжений и токов, угрожающих работоспособности полупроводниковых компонентов, в нестационарных режимах, таких как включение/выключение, работа (в том числе длительная) на нагрузку с малым сопротивлением, обрыв цепи нагрузки при выборе тактовой частоты f инвертора из условия $f \leq 1/4\pi\sqrt{L_1 C_1}$, где L_1, C_1 – параметры резонансного контура).

IV. Исследование DC/DC модуля на основе резонансного инвертора

На рис. 3 и 4 в качестве примера приведены диаграммы работы модуля при периодических переключениях его из режима холостого хода в режим номинальной $R_{ном}$ нагрузки (рис. 3) и из режима холостого хода на нагрузку с сопротивлением $0,001 \cdot R_{ном}$ (рис. 4), соответствующей практическому режиму короткого замыкания (КЗ) на выходных зажимах модуля, при котором его выходное напряжение практически равно нулю. Режиму холостого хода на рис. 4 предшествует интервал нарастания выходного напряжения модуля, где происходит зарядка конденсатора C_2 выходного фильтра.

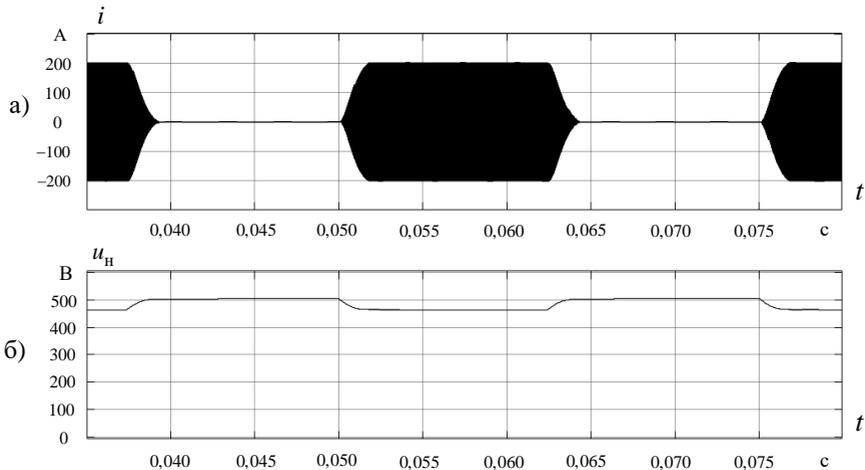


Рис. 3. Диаграммы тока дросселя резонансного контура (а) и выходного напряжения (б) модуля на холостом ходу и номинальной $R_{ном}$ нагрузке

Fig. 3. Diagrams of the choke current of the resonant circuit (a) and the output voltage (b) of the module at no-load and nominal $R_{ном}$ load

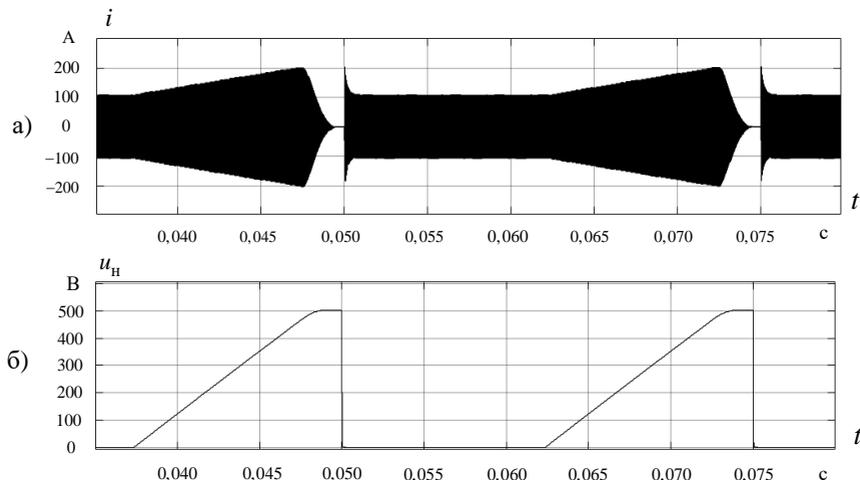


Рис. 4. Диаграммы тока дросселя резонансного контура (а) и выходного напряжения (б) модуля на холостом ходу и КЗ нагрузки

Fig. 4. Diagrams of the choke current of the resonant circuit (a) and the output voltage (b) of the module at no-load and short-circuit load

Диаграммы получены на имитационной модели в среде *MATLAB Simulink* при следующих параметрах модели:

- напряжение питания модуля $U_n = 500$ В;
- номинальное выходное напряжение модуля $U_{\text{вых}} = 500$ В;
- индуктивность резонансного контура $L_1 = 9$ мкГн;
- емкость конденсатора резонансного контура $C_1 = 1,6$ мкФ;
- емкость конденсатора выходного фильтра $C_2 = 670$ мкФ;
- добротность резонансного контура $Q = 24$;
- тактовая частота $f = 20$ кГц;
- коэффициент k_{21} трансформации $k_{21} = 2$.

Из приведенных диаграмм следует, что в динамических режимах работы при скачкообразном набросе/сбросе нагрузки модуля, выполненного по рассматриваемой схеме, величины токов и напряжений в его силовой схеме не выходят за пределы рабочих значений, что значительно упрощает алгоритм управления им и повышает надежность его работы.

V. DC/DC модуль на основе резонансного инвертора с мягкой коммутацией

Весьма перспективным представляется применение при создании такой СЭ *SiC MOSFET* с *SiC* диодами Шоттки с реализацией мягкой (*ZVS*) коммутации транзисторов модулей. Это позволяет без изменения алгоритма

управления модулями и незначительной коррекции импульсов управления транзисторами значительно повысить тактовую частоту и уменьшить массу и габариты моточных компонентов АИ.

На рис. 5 приведена схема силовой части модуля ПЧ СЭ, в котором, аналогично изложенному в [8], реализуется *ZVS* коммутация *MOSFET*. Схема отличается от базовой (рис. 2) наличием дополнительного дросселя *L2* относительно небольшой мощности, емкостного делителя *C3*, *C4*, а также снабберных конденсаторов *C5*, *C6*, включаемых параллельно транзисторам. В качестве емкостного делителя могут быть использованы два последовательно включенных конденсатора входного фильтра модуля.

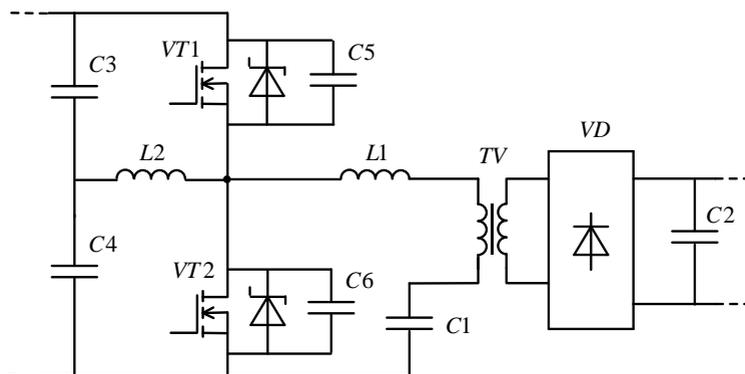


Рис. 5. Схема силовой части модуля ПЧ СЭ с *ZVS* - коммутацией

Fig. 5. Power section diagram of the module with *ZVS*

VI. Вольтодобавочный модуль

В структуре НЧ (рис. 1) имеется вольтодобавочный модуль (ВДМ) с регулируемым выходным напряжением, который предназначен для поддержания неизменным выходного напряжения СЭ.

Этот модуль может быть выполнен, например, на основе АИ с широтно-импульсной модуляцией, или иметь какое-либо другое схемное решение. С целью унификации узлов СЭ ВДМ в структуре на рис. 1 реализован на основе нерегулируемого РИ, вход которого подключен к выходу прямоходового широтно-импульсного преобразователя (ШИП) (рис. 6). Управление ШИП осуществляется в соответствии с сигналами обратной связи по выходному току и напряжению НЧ СЭ, поступающих с датчиков ДТ и ДН (рис. 1).

Корректно настроенная положительная обратная связь по току позволяет скомпенсировать суммарное падение напряжения на активном сопротивлении КТ и в силовых элементах ПЧ СЭ под нагрузкой, а отрицательная обратная связь по выходному напряжению НЧ – устранить влияние на него отклонений напряжения питающей сети от номинального значения.

В качестве датчиков могут быть использованы микросхемы типа *ACNT-H87A-500E* [9], которые позволяют реализовать высокопотенциальную гальваническую развязку силовых цепей и цепей управления СЭ.

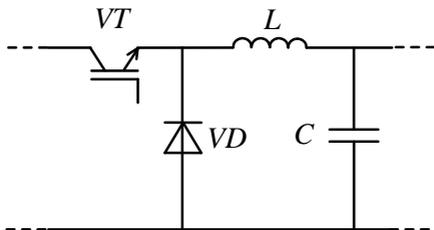


Рис. 6. Схема силовой части ШИП вольтодобавочного модуля

Fig. 6. Diagram of the power part of the DC converter for the voltage supplement module

Система управления группой модулей ПЧ содержит автономный N каналный генератор импульсов управления транзисторами N модулей. Тактовая частота f_n каждого из каналов пропорциональна задающему напряжению $U_n^{\text{зад}}$. При равенстве задающих напряжений $U_1^{\text{зад}} = U_2^{\text{зад}} = U_n^{\text{зад}} = U_N^{\text{зад}}$ всех каналов фазовый сдвиг φ_n управляющих импульсов n -го модуля фиксирован и равен $\varphi_n = 2\pi(n-1)/N$. Фазовый сдвиг управляющих импульсов транзисторами в каждом модуле равен π . Такое управление обеспечивает низкий уровень переменной составляющей тока, потребляемого группой модулей ПЧ.

Системы управления модулями НЧ и ПЧ реализованы на контроллере *STM32F405RGT6* [10]. Питание узлов системы управления ПЧ СЭ осуществляется напряжением, снимаемым с одного из последовательно соединенных конденсаторов входного фильтра ПЧ.

VII. Заключение

Предложенная модульная структура силовых цепей позволяет унифицировать схемные решения *DC/DC* модулей надводной и подводной части СЭ.

Применение *DC/DC* преобразователя на основе последовательного полумостового резонансного инвертора позволяет обеспечить стабильный характер протекания электромагнитных процессов в нем в нестационарных

режимах при значениях токов и напряжений, не превышающих их рабочих значений в квазиустановившихся режимах.

Силовая часть модулей СЭ может быть выполнена на базе *SiC MOSFET* с *SiC* диодами Шоттки и мягкой коммутацией, что позволяет при неизменном алгоритме управления увеличить тактовую частоту и минимизировать моточные компоненты АИ.

© Ваняев В.В., 2025

© Соколов В.В., 2025

© Дарьенков А.Б., 2025

© Кукушкин А.В., 2025

© Бердников И.Е., 2025

© Слuzов А.П., 2025

© Храмов А.Е., 2025

Поступила в редакцию 27.01.2025

Принята к публикации 03.02.2025

Received 27.01.2025

Accepted 03.02.2025

Библиографический список

- [1] Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н., Бубнов О.В. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов // Известия Томского Политехнического Университета. 2004. Т. 307. № 5. С. 120-123.
- [2] Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н., Бубнов О.В. Массогабаритные характеристики системы электропитания в функции от рабочей глубины телеуправляемого подводного аппарата // Известия Томского Политехнического Университета. 2006. Т. 309. № 1. С. 163-167.
- [3] Шматков А.А., Крутиков П.В., Шматков А.Г., Олешко Р.В. Разработка модульной системы электропитания и движительного комплекса типа тяжелого рабочего класса на постоянном токе // Подводные Исследования и Робототехника. 2021. № 4 (38). С. 15-25. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_38_04_02
- [4] Fard R.N., Tedeschi E. Power system design considerations for a seafloor mining vehicle // 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Sep. 23-27, 2018, Portland, OR, USA: IEEE, 2018. P. 1164-1171. DOI: 10.1109/ECCE.2018.8558004
- [5] Герасимов В.А., Комлев А.В., Найденко Н.А., Филоженко А.Ю. Исследование и разработка системы энергообеспечения привязного подводного робота с модернизированным источником электропитания // Подводные Исследования и Робототехника. 2021. № 3 (37). С. 82-89. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_37_03_08
- [6] Ваняев В.В., Копелович Е.А., Троицкий М.М. Расчет транзисторно-конденсаторных источников ускоряющего напряжения гиротронов // Практическая Силовая Электроника. 2018. № 1 (69). С. 11-18.
- [7] Ваняев В.В., Соколов В.В., Дарьенков А.Б., Копелович Е.А., Бердников И.Е., Слuzов А.П., Смирнова А.В. Особенности работы источника электропитания на

- базе последовательного резонансного инвертора // Электротехника. 2024. № 10. С. 28-34. DOI: 10.53891/00135860-2024-10-28-34
- [8] Ваняев В.В., Копелович Е.А. Зарядное устройство емкостного накопителя энергии, Пат. 2810546 RU, заявл. 11.10.23; опубл. 27.12.23. – Бюл. № 36.
- [9] ACNT-H87B, ACNT-H87A, ACNT-H870. Precision optically isolated voltage sensor in a 15-mm stretched SO-8 package. [Электронный ресурс]. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/163/DOC011163218.pdf> (дата обращения 04.02.2025).
- [10] STM32F405xx STM32F407xx. Datasheet - production data. [Электронный ресурс]. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/529/DOC010529700.pdf> (дата обращения 04.02.2025).

References

- [1] V.M. Rulevskiy, Yu.N. Dementyev and O.V. Bubnov, “Sistemy elektropitaniya te-leupravlyаемых podvodnyh apparatov [Power supply systems for remotely operated underwater vehicles]”, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, vol. 307, no. 5, pp. 120-123, 2004 (in Russian).
- [2] V.M. Rulevskiy, Yu.N. Dementyev and O.V. Bubnov, “Mass characteristics of power supply system in the function from operating depth of remotely controlled submersible craft”, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, vol. 309, no. 1, pp. 163-167, 2006.
- [3] A.A. Shmatkov, P.V. Krutikov, A.G. Shmatkov and R.V. Oleshko, “Development of a modular power supply system and propulsion system for a heavy work class rov”, *Underwater Investigations and Robotics*, vol. 4, no. 38, pp. 15-25, 2021. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_38_04_02
- [4] R.N. Fard and E. Tedeschi, “Power system design considerations for a seafloor mining vehicle”, in proc. *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Sep. 23-27, 2018, Portland, OR, USA, pp. 1164-1171. DOI: 10.1109/ECCE.2018.8558004
- [5] V.A. Gerasimov, A.V. Komlev, N.A. Naidenko and A.Yu. Filozhenko, “Research and development of an energy supply system for a tethered underwater robot with an upgraded power source”, *Underwater Investigations and Robotics*, vol. 3, no. 37, pp. 82-89, 2021. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_37_03_08
- [6] V.V. Vanyaev, E.A. Kopelovich and M.M. Troitsky, “Design of transistor-capacitor sources of gyrotrons’ accelerating voltage”, *Practical Power Electronics*, vol. 1, no. 69, pp. 11-18, 2018.
- [7] V.V. Vanyaev, V.V. Sokolov, A.B. Dar'enkov, E.A. Kopelovich, I.E. Berdnikov, A.P. Sluzov and A.V. Smirnova, “Features of operation of a secondary power supply source based on a serial resonant inverter”, *Elektrotehnika*, no. 10, pp. 28-34, 2024. DOI: 10.53891/00135860-2024-10-28-34
- [8] V.V. Vanyaev and E.A. Kopelovich, “Capacitive energy storage charger”, Patent RU 2810546, Dec. 27, 2023.
- [9] ACNT-H87B, ACNT-H87A, ACNT-H870. Precision optically isolated voltage sensor in a 15-mm stretched SO-8 package. [Online]. Available at: <https://static.chipdip.ru/lib/163/DOC011163218.pdf> [Accessed: Feb. 4, 2025].
- [10] STM32F405xx STM32F407xx. Datasheet - production data. [Online]. Available at: <https://static.chipdip.ru/lib/529/DOC010529700.pdf> [Accessed: Feb. 4, 2025].

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Ваняев Валерий Владимирович, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Valery V. Vanyaev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Соколов Виктор Васильевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Victor V. Sokolov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Дарьенков Андрей Борисович, доктор технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Andrey B. Darienkov, Doct. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Кукушкин Андрей Валерьевич, генеральный директор ООО «КОМПАНИЯ «ВИД», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Andrey V. Kukushkin, general manager of the LLC “VID” Company, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Бердников Иван Евгеньевич, инженер АО «Автомобильный завод «УРАЛ», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Ivan E. Berdnikov, engineer of the JSC Automobile Plant URAL, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Слузов Антон Павлович, инженер АО «Автомобильный завод «УРАЛ», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Anton P. Sluzov, engineer of the JSC Automobile Plant URAL, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Храмов Антон Евгеньевич, младший научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Anton E. Khramov, junior researcher of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

УДК 621.316.925:621.332.3

EDN SWCJXI

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ КОНТАКТНОЙ СЕТИ. ЧАСТЬ 1

А.Л. Куликов

ORCID: 0000-0003-1092-7136 e-mail: inventor61@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижегород, Россия

В.Л. Осокин

ORCID: 0000-0001-8772-4252 e-mail: osokinvl@mail.ru

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет
Княгинино, Нижегородская область, Россия

Д.А. Леваков

ORCID: 0009-0006-5706-7515 e-mail: dmitriy.levakov@mail.ru

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет
Княгинино, Нижегородская область, Россия

Невозможностью обеспечения резервирования линий электропередач контактной сети обусловлена большая длительность задержек движения электроподвижного состава в случае возникновения устойчивых коротких замыканий (КЗ). Одним из основных факторов, препятствующих уменьшению временных затрат на устранение неисправности и восстановление нормальной работы системы тягового электроснабжения, является невозможность быстрого и точного определения места повреждения (ОМП) с использованием существующих методов. Несмотря на то, что к настоящему времени разработано значительное количество дистанционных методов определения места короткого замыкания (ОМКЗ) контактной сети, накоплен большой опыт эксплуатации устройств, реализующих функцию ОМКЗ и выполнено большое количество исследований на тему повышения точности средств дистанционного ОМП, ни один из известных способов не обладает достаточной эффективностью с точки зрения уменьшения ущерба при устойчивых КЗ, что обуславливает актуальность разработки более точных методов ОМП контактной сети.

В первой части статьи определено назначение средств дистанционного ОМП в контексте системы ОМП контактной сети и автоматизированной системы управления электроснабжения железных дорог в целом. Дана общая характеристика дистанционным методам ОМП, приведена их классификация и рассмотрены импульсные и петлевые методы, а также ОМП с использованием технологии распределенного акустического зондирования.

Ключевые слова: определение мест повреждений, определение места короткого замыкания, контактная сеть, система тягового электроснабжения, электрифицированный железнодорожный транспорт.

Для цитирования: Куликов А.Л., Осокин В.Л., Леваков Д.А. Сравнительный анализ и перспективы развития дистанционных методов определения мест повреждений контактной сети. Часть 1 // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 1. С. 16-35. EDN SWCJXI

COMPARATIVE ANALYSIS AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF DISTANCE METHODS FOR OVERHEAD CATENARY NETWORK FAULT LOCATION. PART 1

A.L. Kulikov

ORCID: **0000-0003-1092-7136** e-mail: **inventor61@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

V.L. Osokin

ORCID: **0000-0001-8772-4252** e-mail: **osokinvl@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Engineering and Economical University
Knyaginino, Nizhny Novgorod region, Russia

D.A. Levakov

ORCID: **0009-0006-5706-7515** e-mail: **dmitriy.levakov@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Engineering and Economical University
Knyaginino, Nizhny Novgorod region, Russia

Abstract. The impossibility of reservation of the overhead catenary network lines is due to the long delays in the movement of electric rolling stock during persistent short circuits. One of the main factors preventing the reduction of time spent on troubleshooting and restoring of a traction power supply system normal functioning is the impossibility of quick and accurate fault location (FL) using existing methods. Despite the fact that a significant number of the distance methods for a short circuit location (SCL) in a overhead catenary network have been developed, a great deal of experience has been accumulated in the operation of devices implementing the SCL function, and a large number of studies have been carried out on the topic of increasing the accuracy of a distance FL tools, none of the known methods is sufficiently effective in terms of damage reducing during persistent short circuits, which determines the relevance of developing more accurate methods for the overhead catenary network FL.

The first part of the article defines the purpose of distance FL tools in the context of the FL system of the overhead catenary network and the automated power supply control

system of railways in general. A general description of remote FL methods is given, their classification is presented, and pulse and loop methods are considered, as well as FL using distributed acoustic sensing technology.

Keywords: fault location, short circuit location, overhead catenary network, traction electric power supply system, electrified railway transport.

For citation: A.L. Kulikov, V.L. Osokin and D.A. Levakov, "Comparative analysis and prospects for development of distance methods for overhead catenary network fault location. Part 1", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 16-35, 2025. EDN SWCJXI

I. Введение

Эксплуатационная протяженность электрифицированных железнодорожных путей общего пользования Российской Федерации составила около половины общей эксплуатационной длины Российских железных дорог или более 43,5 тыс. км [1]. Известно, что удельный вес электрического транспорта в общем объеме железнодорожных перевозок в настоящее время составляет около 80 %, а средняя грузонапряженность электрифицированных линий более чем в 4 раза превышает значение аналогичного показателя, характеризующего не электрифицированные железные дороги. Ввиду значительности доли грузовых и пассажирских перевозок, осуществляемых посредством железнодорожного транспорта, и его ведущей роли в обеспечении грузевого грузооборота (87 % без учета трубопроводного транспорта), электрифицированные железные дороги являются важной частью транспортного комплекса России и обладают высокой значимостью, с точки зрения удовлетворения ожиданий его основных пользователей и потребителей, а также представляет собой важную часть производственной и социальной инфраструктуры [1, 2].

Преимущества электрической тяги перед тепловозной заключаются в лучших технико-экономических показателях электрифицированных линий, таких как возможность реализации больших грузонапряженности и участковой скорости движения, обеспечения большей пропускной и провозной способности железных дорог при меньшей себестоимости перевозок. Большой экономической и энергетической эффективностью электрической тяги обусловлена общемировая тенденция развития железнодорожного транспорта в сторону увеличения роли этого вида тяги и возложения на электрифицированные железные дороги до 90% объема перевозок [2]. Вышеперечисленные преимущества, связанные с использованием электрической тяги, учтены в действующей Транспортной стратегии России [1], согласно которой в настоящее время является целесообразной реализация таких мероприятий, как дальнейшее расширение полигона электрифицированных железных дорог, усиление мощности энергетического хозяйства

уже электрифицированных линий и постепенный отказ от закупки дизельных локомотивов в пользу увеличения парка электроподвижного состава (ЭПС).

Современные тенденции развития железнодорожного транспорта и необходимость минимизации избыточных совокупных издержек на перевозку обуславливают особую актуальность проблемы внедрения новых технологий и технических решений в части управления системами электропитания железных дорог (СЭЖД) в различных режимах работы. Решение указанной проблемы требует дальнейшего совершенствования автоматизированных систем управления электроснабжением (АСУЭ) железных дорог с целью повышения надежности электроснабжения тяговых потребителей, обеспечения оптимальных условий передачи и распределения электроэнергии и обеспечения высоких значений технико-экономических показателей работы электрифицированных линий [1, 3, 4]. АСУЭ представляет собой комплекс устройств телемеханики, технологической и системной автоматики различного назначения, структура которого продемонстрирована на рис. 1 [3, 5].



Рис. 1. Структурная схема АСУЭ железных дорог

Fig. 1. Structural diagram of automated power supply control system of a railways

Важной составляющей комплекса устройств сетевой автоматики, предназначенных для выявления, предотвращения развития и ликвидации аварийных режимов в СЭЖД, являются средства дистанционного определения места повреждения (ОМП) линий электропередач (ЛЭП) контактной сети. Необходимость оснащения железнодорожной тяговой сети устройствами, реализующими функцию ОМП, является следствием особенностей устройства и условий работы системы тягового электроснабжения (СТЭ).

Воздействие неблагоприятных факторов и подверженность проводов и конструкций контактной сети посторонним и атмосферно-климатическим воздействиям, а также ошибочным действиям обслуживающего персонала обуславливают повышенную повреждаемость контактной сети: среднее число отключений выключателей питающих фидеров по причине короткого замыкания (КЗ) составляет около 10 случаев в год [2-4, 6, 7]. Важной особенностью тяговой сети, с точки зрения обеспечения надежного электроснабжения тяговых потребителей, является отсутствие резервирования ЛЭП контактной сети, вследствие чего повреждения их элементов часто приводят к длительному прекращению тягового электроснабжения на значительном протяжении. На высокую степень повреждаемости контактной сети и надежность функционирования СТЭ также указывают статистические данные, приведенные в исследовании [8], согласно которым на контактную сеть приходится свыше 90 % случаев нарушения нормальной работы электрифицированного железнодорожного транспорта, доля которых в общем времени задержек движения поездов составляет 75 %.

К числу наиболее тяжелых аварийных ситуаций, которыми сопровождается эксплуатация тяговой сети, относятся КЗ, возникающие в результате соединения проводов и тросов контактной сети с землей, ходовыми рельсами или заземленными элементами опор. Опыт эксплуатации СТЭ и статистические данные показывают, что 80-90 % КЗ на линиях контактной сети являются неустойчивыми или преходящими [9]. Такие КЗ самоликвидируются после снятия напряжения с поврежденного участка сети, в этом случае действие автоматики повторного включения (АПВ) контактной сети оказывается успешным, и электроснабжение возобновляется после непродолжительной бестоковой паузы. При устойчивых КЗ, причина которых не самоустраняется после отключения поврежденной линии, для восстановления тягового электроснабжения на поврежденном участке контактной сети требуется проведение ремонтно-восстановительных работ [3, 6, 10, 11]. Ввиду большой протяженности ЛЭП контактной сети, одной из наиболее трудоемких и длительных операций при ликвидации аварии является определение места короткого замыкания (ОМКЗ), быстрота осуществления которого в значительной мере определяет совокупное время отключенного состояния линии. Этими обстоятельствами, а также необходимостью минимизации ущерба, связанного с нарушениями перевозочного процесса и задержками в движении поездов при устойчивом КЗ, обусловлена необходимость применения на тяговых подстанциях (ТП) и постах секционирования (ПС) устройств сетевой автоматики контактной сети, реализующих функцию дистанционного ОМП линии.

Хотя создание первых таких устройств относится к периоду становления АСУЭ железных дорог в начале 1960-х гг., однако и в настоящее

время по-прежнему отсутствуют достаточно эффективные средства ОМП контактной сети, позволяющие оперативно выявлять место устойчивого КЗ [3, 9]. Основным фактором, ограничивающим эффективность применения устройств для определения расстояния до места КЗ и препятствующим их внедрению, является невозможность обеспечения высокой точности определения расстояния до места КЗ при использовании известных методов дистанционного ОМП контактной сети. Этим обстоятельством в совокупности с целями и задачами развития российского транспортного комплекса, приведенными в [1], обусловлена сохраняющаяся актуальность проблемы разработки новых способов ОМП контактной сети, позволяющих точно и быстро выявить место устойчивого КЗ.

Несмотря на отсутствие решений, в полной мере удовлетворяющих указанным требованиям, за прошедший период времени накоплен значительный опыт разработки дистанционных методов ОМКЗ и эксплуатации устройств защиты и автоматики контактной сети, реализующих методы ОМП, а также выполнено большое количество теоретических исследований, направленных на разработку более эффективных способов решения задачи ОМП ЛЭП тяговой сети. Значительный вклад в развитие теории ОМП контактной сети и реализацию новых технических решений, направленных на повышение эффективности ОМП, выполнен отечественными авторами: Е.П. Фигурновым, Ю.Я. Самсоновым, Ю.И. Жарковым, А.С. Бочевым, В.Я. Овласюком, Г.М. Корсаковым, В.А. Зимаковым, И.П. Петровым, Н.А. Поповой, В.Н. Пупыниным, А.Л. Быкадоровым, Т.А. Заруцкой, Л.А. Германом, К.С. Субханвердиевым. Ими и другими авторами опубликовано большое количество научных работ по теме ОМП контактной сети и разработано множество методов определения расстояния до места КЗ, в связи с чем особую актуальность приобретает задача обобщения и систематизации разработок.

В статье анализируются существующие способы ОМП, отмечены их наиболее существенные преимущества и недостатки, а также выявлены основные тенденции развития подходов к организации ОМП ЛЭП контактной сети. Кроме того, развитие информационных технологий и цифровой вычислительной техники обуславливают необходимость повторного рассмотрения известных методов ОМП с учетом расширения возможностей устройств защиты и автоматики тяговой сети и АСУЭ железных дорог в целом.

II. Специфика задачи ОМКЗ в контактной сети

В общем случае комплекс мероприятий, направленных на поиск места устойчивого КЗ на ЛЭП и выявление ее поврежденного элемента (например, перекрытого или пробитого изолятора), представляет собой совокупность последовательно совершаемых операций [6]:

- 1) определение поврежденной части сети;
- 2) автоматическое повторное включение;
- 3) применение дистанционных методов ОМП;
- 4) применение топографических методов ОМП.

Как правило, определение поврежденной части сети осуществляется автоматически при срабатывании селективной релейной защиты от КЗ. Этот случай, применительно к контактной сети двухпутного участка с ПС, проиллюстрирован на рис. 2а. К особенностям СТЭ, оказывающим значительное влияние на процедуру определения поврежденного участка контактной сети, относится широкое использование неселективного способа организации схемы защиты от КЗ [4, 12]. Его сущность заключается в отключении без выдержки времени выключателей всех питающих фидеров смежных ТП при аварии в любой точке межподстанционной зоны, как показано на рис. 2б. В этом случае выделение аварийного участка контактной сети в зависимости от состава защит и установленного оборудования может осуществляться путем сравнения модулей токов смежных присоединений в момент КЗ [4, 13], или может быть выполнено на этапе повторного включения.

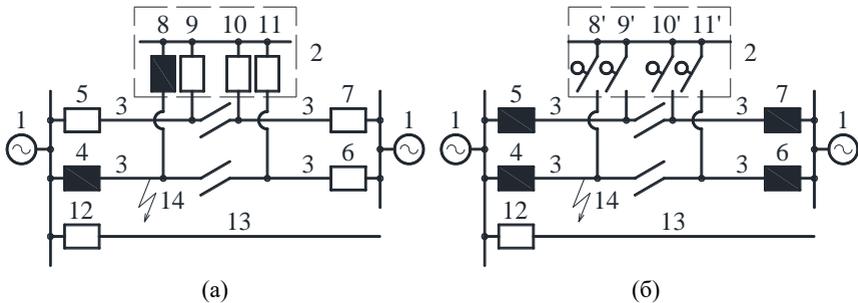


Рис. 2. Примеры селективного (а) и неселективного (б) способов организации защиты тяговой сети от КЗ:

1 – ТП; 2 – ПС; 3 – контактная сеть; 4–12 – выключатели (черным цветом выделены выключатели, отключаемые при КЗ в точке 14); 8'–11' – разъединители; 13 – линия «два провода-рельсы»; 14 – место КЗ

Fig. 2. Examples of selective (a) and non-selective (b) methods of short circuits protection for traction network:

1 – traction substations; 2 – sectioning point; 3 – overhead catenary network; 4–12 – breakers (switched off in the event of a short circuit at the point 14 are highlighted in black); 8'–11' – disconnectors; 13 – transmission line; 14 – short circuit location

Второй этап представляет собой повторную подачу рабочего напряжения на ранее отключенную часть сети [6]. Вместе с тем, АПВ линии, содержащей устойчивое КЗ, является крайне нежелательным ввиду повышенного износа силового оборудования, опасности перегрева проводов, тросов и струн контактной сети и, следовательно, увеличения объема ущерба при аварии [4, 5, 12]. С целью предотвращения подачи рабочего напряжения на неустранившееся КЗ, а также для выделения фидерной зоны с поврежденной контактной сетью ТП или ПС оборудуются устройствами контроля и поиска КЗ (УККЗ и УПКЗ), позволяющими быстро производить диагностирование сети на предмет устойчивого повреждения. В настоящее время известно большое количество таких устройств [13-19], работа которых основана на анализе характеристик остаточного напряжения, генерируемого фазорасщепителями ЭПС, или наводимого со стороны ЛЭП системы «два провода-рельс» (ДПР-27,5 кВ) и оставшихся в работе линий контактной сети параллельных путей [4, 12, 20, 21]. Таким образом, при использовании указанных решений в части автоматизации СТЭ осуществляются определение поврежденной части тяговой сети и повторная подача рабочего напряжения в случае самоустраняющегося КЗ.

Принцип контроля наведенного напряжения также положен в основу действия ряда УПКЗ [22–24], предназначенных для определения аварийного участка контактной сети при наличии устойчивого КЗ, информация о котором необходима для вывода поврежденного оборудования в ремонт. Способ отыскания зоны КЗ, реализуемый этими устройствами, представляет собой развитие наиболее простого и широко применяемого метода поиска поврежденного участка, заключающегося поочередном отключении продольных разъединителей и опробовании контактной сети подачей рабочего напряжения. При этом происходит включение на устойчивое КЗ, о негативных последствиях которого сказано выше.

Эффективным способом решения этой задачи, лишенным недостатков, связанных с подачей рабочего напряжения на неустранившееся КЗ и необходимостью многократных включений и отключений выключателя поврежденной контактной сети, является метод определения зоны КЗ, основанный на использовании УПКЗ [3-5, 9, 25-27]. Процесс определения поврежденной зоны происходит путем последовательного отключения разъединителей и фиксации равенства нулю измеряемого напряжения при наличии КЗ. При этом, в отличие от метода поиска места КЗ опробованием контактной сети, выключатель остается отключенным на всем протяжении описанной процедуры, и повторное включение осуществляется только после отделения поврежденной зоны от смежных ТП. Структурные схемы поиска места КЗ опробованием контактной сети и использованием одного из вариантов УПКЗ приведены на рис. 3а и б соответственно.

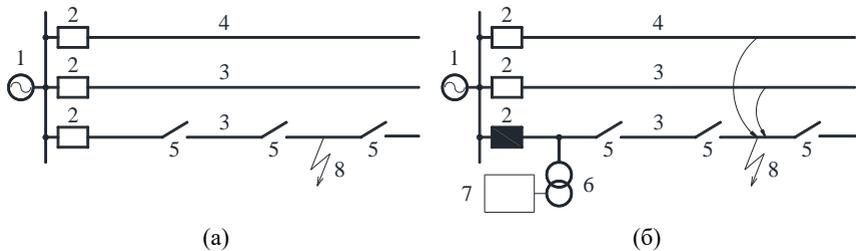


Рис. 3. Структурная схема поиска зоны КЗ
путем опробования контактной сети (а); с использованием УПКЗ (б):
 1 – ТП; 2 – выключатели; 3 – контактная сеть; 4 – линия «два провода-рельс»;
 5 – продольные разъединители; 6 – трансформатор напряжения; 7 – УПКЗ;
 8 – место устойчивого КЗ

Fig. 3. Structural diagram of searching a short circuit zone by testing the overhead catenary network (a) and using the special device (b):

1 – traction substation; 2 – breakers; 3 – overhead catenary network;
 4 – transmission line; 5 – longitudinal disconnectors; 6 – voltage transformer;
 7 – device for a short circuit searching; 8 – short circuit location

Эти способы непосредственно относятся к теме статьи, поскольку их применение позволяет быстро локализовать место устойчивого КЗ в пределах определенной секции и, тем самым, уменьшить длину зоны поиска поврежденного элемента сети и ускорить восстановление ее нормального функционирования. Вместе с тем, несмотря на преимущества схем автоматизации тяговой сети с использованием УПКЗ, точное определение расстояние до места устойчивого КЗ по-прежнему является невозможным, т.к. при использовании метода, проиллюстрированного на рис. 3, определяется только зона между соответствующими разъединителями [25], что диктует необходимость применения средств дистанционного и топографического ОМП. Последние предназначены для точного определения местоположения точки КЗ, а преимущества и недостатки обеих групп способов ОМКЗ обуславливают целесообразность их комплексного применения [6].

Реализация дистанционных способов ОМП тяговой сети (рис. 4) основана на использовании различных приборов и устройств, устанавливаемых на тяговых подстанциях, постах секционирования контактной сети и автотрансформаторных пунктах (АТП). Назначением этих методов является быстрая локализация места КЗ, в том числе неустойчивого, информация о местоположении которого представляет значительную ценность, с точки зрения обеспечения надежности СТЭ. Вместе с тем, известные способы дистанционного ОМКЗ имеют большие погрешности, составляющие от нескольких сотен метров до нескольких километров, в связи с чем для

уточнения места КЗ требуется применение топографических (трассовых) способов ОМП [3, 6, 28].

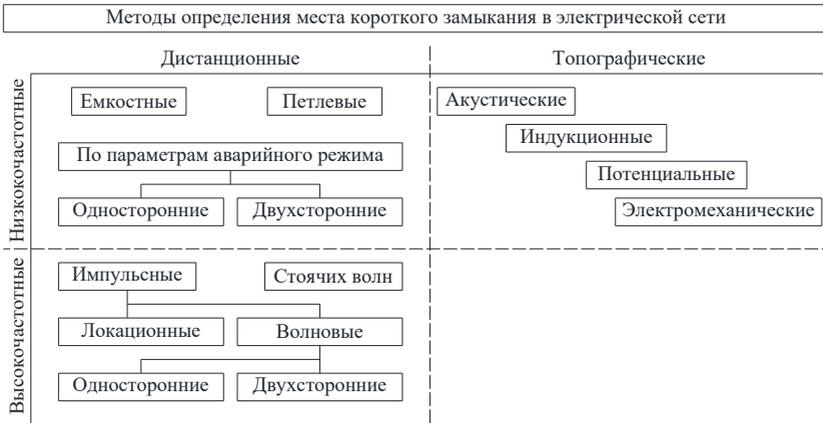


Рис. 4. Схема классификации методов ОМП

Fig. 4. Classification of the fault locating methods

Применение топографических методов (рис. 4) подразумевает поиск точного места повреждения при движении поисковой бригады или транспортного средства, оснащенного средствами топографического ОМП, вдоль трассы обследуемой линии [6, 28]. Примерами таких способов являются отечественные акустический [29] и индукционный [30] методы, а также немецкий метод [31], основанный на контроле сигналов от передатчиков, устанавливаемых на проводниках или конструкциях контактной сети, при помощи размещаемого на транспортном средстве устройства. Поскольку средства топографического ОМП находятся в распоряжении ремонтных служб и линейного персонала и не являются составной частью АСУЭ железных дорог, ниже будут рассмотрены только дистанционные методы ОМП контактной сети.

III. Классификация и характеристика дистанционных методов ОМП

С учетом различий в теоретических основах дистанционных методов ОМП ЛЭП, их совокупность принято разделять на группы низко- и высокочастотных методов в зависимости от характера электрических процессов, анализ которых производится для определения удаленности места КЗ [6, 28]. При этом к низкочастотному диапазону применительно к ВЛ относятся частоты до 1 кГц, а к высокочастотному – от 30 до 1000 кГц.

В практике ОМП ЛЭП общего назначения широкое распространение получило применение импульсных методов, в основу принципа действия

которых положено измерение интервалов времени распространения электромагнитных волн или импульсов на участках между местом повреждения и одним или двумя концами линии [3, 6, 28]. Имеются различия между волновыми и локационными методами, составляющими группу импульсных способов. Локационные методы основаны на вычислении расстояния до места повреждения на основании измеряемого времени распространения зондирующего импульса от одного из концов ЛЭП, на котором устанавливается локационный искатель, до места КЗ и в противоположном направлении. Сущность волновых методов заключается в анализе волновых процессов при КЗ, при этом производится измерение времени пробега не специально генерируемого импульса, а электромагнитных волн, возникающих в месте повреждения [6, 28, 32]. Несмотря на высокую эффективность импульсных методов при ОМП в трехфазных сетях общего назначения, применение этих способов для ОМКЗ контактной сети существенно затрудняется ввиду влияния факторов, связанных с особенностями устройства СТЭ. Отечественный опыт разработки локационных методов ОМП контактной сети, попытки создания которых были предприняты Г.М. Корсаковым и В.А. Зимаковым в 1960-х гг., свидетельствует об их высокой чувствительности к различным неоднородностям и ответвлениям линии: многократное отражение импульсов от токоприемников, ПС, пунктов параллельного соединения (ППС) контактных подвесок, АТП, нейтральных вставок и большого числа других элементов тяговой сети, нарушающих ее однородность, затрудняет отбор необходимых отраженных импульсов, препятствует автоматизации процедуры ОМП и вносит большие погрешности в результаты расчета расстояния до места повреждения [33, 34].

Петлевые методы, применяемые в сетях общего назначения для ОМП кабельных линий и основанные на измерении токов в поврежденном и исправном проводниках, соединяемых по концам линии и подключаемых к источнику питания [6, 28], имеют варианты, адаптированные для использования в тяговой сети. К числу таких методов относятся российский [35] и японский [36] способы ОМП, при реализации которых в качестве второго проводника используется контактная сеть параллельного пути, как показано на рис. 5.

Расстояние x до места КЗ в однородной контактной сети при равных удельных сопротивлениях контактных подвесок параллельных путей, согласно [35], рассчитывается на основании токораспределения в параллельных линиях:

$$x = 2 \cdot L \cdot \frac{I_1/I_2}{(I_1/I_2)+1}, \quad (1)$$

где L – длина измерительной схемы, км.

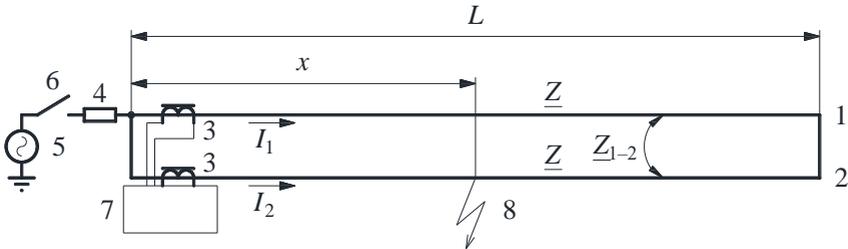


Рис. 5. Принципиальная схема ОМП контактной сети с использованием искусственно создаваемой цепи:

1, 2 – контактная сеть; 3 – трансформаторы тока; 4 – токоограничивающий резистор; 5 – ТП; 6 – ключ; 7 – устройство ОМП; 8 – место повреждения; I_1, I_2 – токи в контактной сети; z – удельное сопротивление контактной сети; z_{1-2} – удельное взаимное сопротивление

Fig. 5. Schematic diagram of the overhead catenary network FL using an artificially created circuit:

1, 2 – overhead catenary network; 3 – current transformers; 4 – current limiting resistor; 5 – traction substation; 6 – breaker; 7 – fault locating (FL) device; 8 – fault location; I_1, I_2 – overhead catenary network currents; z – overhead catenary network impedance; z_{1-2} – mutual impedance

В случае неоднородных или неодинаковых контактных подвесок параллельных путей вместо расчета по (1) в [35] с целью уменьшения погрешности метода предложено определять расстояние x до места повреждения по реальной зависимости $x = f(I_1/I_2)$, составляемой с использованием результатов серии экспериментов.

Предложенный в [35] способ имеет важное преимущество перед методами ОМП по параметрам реального КЗ, которые будут рассмотрены ниже, состоящее в отсутствии влияния переходного сопротивления (электрической дуги, опоры, или троса группового заземления (ТГЗ)) на расчетное значение удаленности места КЗ. Вместе с тем, этот метод не получил широкого распространения ввиду значительного числа коммутаций, требуемых для сборки и разборки измерительной схемы, необходимости отключения контактной сети параллельного пути, невозможности применения этого метода на однопутных участках и невозможности его использования при преходящих КЗ.

Альтернативный способ ОМП контактной сети, имеющий принципиальные отличия от всех указанных групп методов, представляет собой часть системы управления движением поездов, контроля состояния железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава, основанной на применении технологии распределенного акустического зондирования (*Distributed*

Acoustic Sensor (DAS), Fiber Optic Sensing (FOS) или Fiber Optic Acoustic Detection (FOAD)). Сущность этой технологии, нашедшей ограниченное применение на железных дорогах Австрии, Германии, США и Японии, заключается в регистрации изменений параметров оптической среды, обусловленных внешними возмущающими воздействиями [37, 38]. В качестве контролируемой оптической среды используются прокладываемые вдоль трассы железной дороги волоконно-оптические кабели (ВОК), по которым передаются лазерные импульсы.

Деформации ВОК, вызванные прохождением поездов, возникновением оползней, действиями посторонних лиц или КЗ в тяговой сети, приводят к рассеянию передаваемых импульсов. При этом сигнал рассеяния фиксируется измерительной аппаратурой, и по времени его распространения по ВОК судят об удаленности места повреждения. Заявленная точность метода ОМП, основанного на использовании технологии распределенного акустического зондирования, составляет 10 м, однако на его погрешность оказывает влияние большой ряд факторов, к числу которых относятся энергоемкость КЗ, длина и время горения дуги, расстояние от места КЗ до ВОК, влияние окружающего шума и другие [39]. Существенным препятствием для широкого внедрения анализируемого способа ОМП является также нецелесообразность прокладки ВОК и оснащения железных дорог соответствующим измерительным оборудованием с целью решения только задачи ОМКЗ ввиду сложности системы и необходимости значительных капитальных вложений для ее обустройства.

IV. Выводы

В данной части статьи была рассмотрена система ОМП контактной сети в контексте ее места в АСУЭ, охарактеризованы топографические и дистанционные способы ОМП, проанализированы дистанционные методы определения места КЗ или поврежденной секции, не относящиеся к группе методов ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР). В результате проведенного анализа могут быть сделаны следующие выводы.

Применение метода опробования контактной сети нецелесообразно ввиду повышенного износа оборудования тяговой сети и невозможности точного определения удаленности места КЗ. Более перспективный метод поиска поврежденной зоны с использованием УПКЗ также не может использоваться вместо дистанционного ОМП. Импульсные методы характеризуются неудовлетворительной точностью ввиду непригодности для применения в неоднородных и разветвленных тяговых сетях. Петлевой метод требует составления измерительной цепи и временного вывода из работы контактной сети параллельного пути, а область его применения ограничена участками с двумя и более электрифицированными путями. Внедре-

ние технологии распределенного акустического зондирования требует значительных капитальных затрат и является целесообразным только при ее использовании для решения большого перечня задач.

В связи с указанными обстоятельствами, в настоящее время наиболее оптимальным подходом к решению задачи ОМП контактной сети является анализ измеренных значений ПАР. Известные методы ОМП контактной сети по ПАР будут рассмотрены во второй части статьи.

© Куликов А.Л., 2025

© Осокин В.Л., 2025

© Леваков Д.А., 2025

Поступила в редакцию 19.02.2025

Принята к публикации 05.03.2025

Received 19.02.2025

Accepted 05. 03.2025

Библиографический список

- [1] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р «Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» // Правительство России. [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOOpQhLlOnUT91RjCbeR.pdf> (дата обращения 01.02.2025).
- [2] Котельников А.В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы. М.: Интекст, 2002. – 104 с.
- [3] Фигурнов Е.П. Релейная защита. В 2-х ч. 3-е изд. М.: УМЦ ЖДТ, 2009.
- [4] Герман Л.А. Совершенствование тягового электроснабжения переменного тока для повышения пропускной способности железных дорог. Н. Новгород: СамГУПС, 2024. – 186 с.
- [5] Герман Л.А., Селянин В.С. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока // Железнодорожный Транспорт. 2010. № 7. С. 34-40.
- [6] Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
- [7] Пупынин В.Н., Герман Л.А. Диагностика контактной сети переменного тока и современный алгоритм управления выключателями фидеров 27,5 кВ // Наука и Техника Транспорта. 2006. № 2. С. 40-55.
- [8] Галкин А.Г., Митрофанов С.А. Статистический анализ адекватности оценки состояния контактной сети в филиалах ОАО «РЖД» // Инновационный Транспорт. 2011. № 1 (1). С. 48-54.
- [9] Герман Л.А. Автоматизация электроснабжения в аварийных ситуациях тяговой сети железных дорог // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. № 3 (82). С. 196-203.
- [10] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
- [11] Тер-Оганов Э.В., Пышкин А.А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург: УрГУПС, 2014. – 432 с.

- [12] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Вязов Е.В. Автоматизирован пост секционирования на разъединителях с вакуумным выключателем // Локомотив. 2020. № 4 (760). С. 40-42.
- [13] Герман Л.А., Герман И.В., Карпов И.П. Способ автоматизации повторного включения (АПВ) выключателей двухпутного участка переменного тока тягового электроснабжения с постом секционирования на разъединителях, Пат. 2793578 RU, заявл. 23.07.22; опубл. 04.04.23. – Бюл. № 10.
- [14] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Якунин Д.В., Ишкин Д.В., Карпов И.П. Устройство запрета автоматического повторного включения выключателя контактной сети переменного тока двухпутного участка, Пат. 2724143 RU, заявл. 04.10.19; опубл. 22.06.20. – Бюл. № 18.
- [15] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Вязов Е.В., Жевлаков Д.А. Устройство автоматизации поста секционирования контактной сети переменного тока на разъединителях, Пат. 2725823 RU, заявл. 08.07.19; опубл. 06.07.20. – Бюл. № 19.
- [16] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Карпов И.П., Жевлаков Д.А. Устройство контроля короткого замыкания в контактной сети переменного тока двухпутного участка с быстродействующим автоматическим повторным включением (БАПВ) выключателя питающей линии, Пат. 2740160 RU, заявл. 28.07.20; опубл. 12.01.21. – Бюл. № 2.
- [17] Герман Л.А., Герман В.Л. Способ управления автоматическим повторным включением питающей линии контактной сети двухпутного участка, Пат. 2775931 RU, заявл. 05.07.21; опубл. 12.07.22. – Бюл. № 20.
- [18] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Куликов А.Л. Способ автоматического повторного включения (АПВ) питающих линий контактной сети двухпутного участка системы 25 кВ с постом секционирования на разъединителях, Пат. 2795540 RU, заявл. 10.06.22; опубл. 04.05.23. – Бюл. № 13.
- [19] Герман Л.А., Жевлаков Д.А., Герман И.В., Саликов И.А., Котельников А.С., Блохинцев В.А., Галин А.Д., Яшков Е.А. Способ управления автоматическим повторным включением выключателя, Пат. 2803041 RU, заявл. 11.05.23; опубл. 05.09.23. – Бюл. № 25.
- [20] Герман Л.А., Попов А.Ю., Саморуков А.В., Ишкин Д.В., Якунин Д.В., Субханвердиев К.С. Новый алгоритм автоматизации электроснабжения тяговой сети переменного тока с постом секционирования на выключателях // Вестник Научно-исследовательского Института Железнодорожного Транспорта. 2017. № 76 (5). С. 266-272. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-5-266-272
- [21] Герман Л.А., Новиков Е.В. Совершенствование работы интеллектуальных терминалов для автоматизации электроснабжения тяговой сети переменного тока // Наука и Техника Транспорта. 2015. № 4. С. 16-21.
- [22] Герман Л.А., Муреев П.А. Устройство контроля короткого замыкания контактной сети переменного тока, Пат. 85672 RU, заявл. 13.04.09; опубл. 10.08.09. – Бюл. № 25.
- [23] Герман Л.А., Лучкевич О.Р. Устройство определения зоны повреждения контактной сети переменного тока, Пат. 104323 RU, заявл. 03.12.10; опубл. 10.05.11. – Бюл. № 13.

- [24] Герман Л.А., Корнеев В.А., Попов Д.С., Якунин Д.В. Пост секционирования контактной сети переменного тока, Пат. 160050 RU, заявл. 28.10.15; опубл. 27.02.16. – Бюл. № 6.
- [25] Герман Л.А., Попов А.Ю. Оперативно определять зону повреждения в отключенной контактной сети // Локомотив. 2012. № 1 (661). С. 36-38.
- [26] Герман Л.А., Герман В.Л., Саморуков А.В., Попов А.Ю., Попов Д.С. Современные устройства автоматизации электроснабжения тяговой сети переменного тока // Электроника и Электрооборудование Транспорта. 2013. № 1. С. 6-12.
- [27] Герман Л.А., Корнеев В.А., Максимов А.В., Муреев П.А., Куров Д.А., Парфенов М.С. Тяговая сеть автоматизирована // Локомотив. 2015. № 6 (702). С. 41-43.
- [28] Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.
- [29] Мрыхин С.Д., Мрыхин Д.С., Перетокин Б.П., Фигурнов Е.П. Способ и устройство для обнаружения мест повреждения изоляции на контактной сети, Пат. 2187438 RU, заявл. 18.04.00; опубл. 20.08.2002.
- [30] Жарков Ю.И., Семенов Ю.Г., Микаэльян М.В. Топографический способ определения места короткого замыкания в тяговой сети переменного тока, Пат. 2668663 RU, заявл. 27.06.17; опубл. 02.10.18. – Бюл. № 28.
- [31] Baldauf W., Landwehr B., Sarnes B., Tiffe G. Ortung und lokalisierung von kurzschlussstellen in oberleitungsanlagen, Пат. 102006018471 DE, заявл. 19.04.06; опубл. 25.10.07.
- [32] Куликов А.Л., Лоскутов А.А., П.С. Пелевин. Принципы реализации релейной защиты, основанной на распознавании волновых портретов // V Межд. молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы», Октябрь 09-13, 2017, Томск, Россия: ТПУ, 2017. С. 59-63.
- [33] Лёвин Г.М. Устройство для определения расстояния до места повреждения контактной сети, АС 207964 SU, заявл. 26.02.65; опубл. 29.12.67. – Бюл. № 3.
- [34] Лёвин Г.М. Погрешность волнового метода при определении расстояния до места повреждения контактной сети постоянного тока // Труды ВНИИЖТ. 1966. Вып. 315. С. 67-75.
- [35] Пупынин В.Н., Шевлюгин М.В. Способ определения расстояния до места короткого замыкания в многопутных тяговых сетях переменного и постоянного тока и устройство для его осуществления (варианты), Пат. 2237905 RU, заявл. 03.04.01; опубл. 10.10.04.
- [36] Koji A., Tetsuo U. Failure location method, device, program, and computer-readable recording medium, Пат. 2005315842 JP, заявл. 07.01.05; опубл. 10.11.05.
- [37] Попов А.Н., Галинуров Р.З. Волоконно-оптические технологии в системах управления движением поездов и контроля состояния объектов инфраструктуры // Транспорт Урала. 2018. № 3 (58). С. 48-54. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-48-54
- [38] Ефремов А.Ю. Конференция WDF 2017: развитие технологии DAS для железных дорог // Железные Дороги Мира. 2017. № 11. С. 67-74.
- [39] Определение мест коротких замыканий в тяговых сетях при помощи технологии DAS // Железные дороги мира. 2017. № 12. С. 58-63.

References

- [1] Order of the Government of the Russian Federation dated Nov. 27, 2021 no. 3363-r “Transportnaya strategiya Rossijskoj Federacii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda [Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a Forecast for the Period until 2035]”, *The Russian Government*. [Online]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> [Accessed: Feb. 1, 2025] (in Russian).
- [2] A.V. Kotel'nikov, *Elektrifikatsiya zheleznyh dorog. Mirovye tendencii i perspektivy [Railway electrification. World Trends and Prospects]*. Moscow: Intext, 2002 (in Russian).
- [3] E.P. Figurnov, *Releynaya zashchita [Relay protection]*, 3rd ed. Moscow: UMC ZDT, 2009 (in Russian).
- [4] L.A. German, *Sovershenstvovanie tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka dlya povyshcheniya propusknoi sposobnosti zheleznyh dorog [Improving AC traction power supply to increase railway capacity]*. Nizhny Novgorod: SamGUPS, 2024 (in Russian).
- [5] L.A. German and V.S. Selyakin, “Avtomatizatsiya elektrosnabzheniya tyagovoi seti peremennogo toka [Automation of power supply of AC traction network]”, *Zheleznodorozhnyi Transport [Railway Transport]*, no. 7, pp. 34-40, 2010 (in Russian).
- [6] G.M. Shalyt, *Opreделение mest povrezhdeniya v elektricheskikh setyah [Determining fault locations in electrical networks]*. Moscow: Energoizdat, 1982 (in Russian).
- [7] V.N. Pupyin and L.A. German, “On the diagnostics of the alternating current contact system and the algorithm of 27.5 kW feeder switch control”, *Nauka i Tehnika Transporta*, no. 2, pp. 40-55, 2006.
- [8] G.G. Galkin and S.A. Mitrofanov, “Statistical analysis of adequacy of overhead contact system state assessment at “Russian railways” OJSC branches”, *Innotrans*, vol. 1, no. 1, pp. 48-54, 2011.
- [9] L.A. German, “Automation of electric supply in emergency of railways contact networks”, *Transactions of NNSTU n. a. R.E.Alekseev*, vol. 3, no. 82, pp. 196-203, 2010.
- [10] K.G. Markvardt, *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannyh zheleznyh dorog [Power supply for electrified railways]*. Moscow: Transport, 1982 (in Russian).
- [11] E.V. Ter-Oganov and A.A. Pyshkin, *Elektrosnabzhenie zheleznyh dorog [Power supply for railways]*. Ekaterinburg: USURT, 2014 (in Russian).
- [12] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev and E.V. Vyazov, “Avtomatizirovan post sektionirovaniya na raz'edinitelyah s vakuumnym vyklyuchatelem [The sectioning post on disconnectors with a vacuum circuit breaker has been automated]”, *Lokomotiv [Locomotive]*, vol. 4, no. 760, pp. 40-42, 2020 (in Russian).
- [13] L.A. German, I.V. German and I.P. Karpov, “Method for automatic reclosing (AR) of switches of a double-track section of alternating current of traction power supply with a sectioning point on disconnectors”, Patent RU 2793578, Apr. 4, 2023.
- [14] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev, D.V. Yakunin, D.V. Ishkin and I.P. Karpov, “Device for prohibition of automatic repeated switching-on of double-track road AC catenary system circuit breaker”, Patent RU 2724143, Jun. 22, 2020.

- [15] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev, E.V. Vyazov and D.A. Zhevnikov, “Automation device for post of sectioning contact AC network on disconnectors”, Patent RU 2725823, Jul. 6, 2020.
- [16] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev, I.P. Karpov and D.A. Zhevnikov, “Short-circuit monitoring device in alternating current contact network of double-track section with fast-acting automatic repeated switching (FARS) of supply line switch”, Patent RU 2740160, Jan. 12, 2021.
- [17] L.A. German and V.L. German, “Method for controlling the automatic circuit reclosure of the feed line of the contact system of a double-track section”, Patent RU 2775931, Jul. 12, 2022.
- [18] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev and A.L. Kulikov, “Method of automatic reclosing (AR) of the supply lines of contact network of double-track section of 25 kV system with sectioning point at disconnectors”, Patent RU 2795540, May 4, 2023.
- [19] L.A. German, D.A. Zhevnikov, I.V. German, I.A. Salikov, A.S. Kotelnikov, V.A. Blokhintsev, A.D. Galin and E.A. Yashkov, “Circuit breaker auto-reclosing control method”, Patent RU 2803041, Sep. 5, 2023.
- [20] L.A. German, A.Yu. Popov, A.V. Samorukov, D.V. Ishkin, D.V. Yakunin and K.S. Subkhanverdiev, “A new algorithm for automating power supply of an AC traction network with a sectioning points on switches”, *Russian Railway Science Journal*, vol. 76, no. 5, pp. 266-272, 2017. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-5-266-272
- [21] L.A. German and E.V. Novikov, “Improvement of operation of smart terminals for power supply automation of the alternating current traction network”, *Nauka i Tehnika Transporta*, no. 4, pp. 16-21, 2015.
- [22] L.A. German and P.A. Mureev, “Ustroistvo kontrolya korotkogo zamykaniya kontaktnoi seti peremennogo toka [Short circuit monitoring device for AC contact network]”, Patent RU 85672, Aug. 10, 2009 (in Russian).
- [23] L.A. German and O.R. Luchkevich, “Ustroistvo opredeleniya zony povrezhdeniya kontaktnoi seti peremennogo toka [Device for determining the damage zone of the AC contact network]”, Patent RU 104323, May 10, 2011 (in Russian).
- [24] L.A. German, V.A. Korneev, D.S. Popov and D.V. Yakunin, “Post sektsionirovaniya kontaktnoi seti peremennogo toka [AC contact network section post]”, Patent RU 160050, Feb. 2, 2016 (in Russian).
- [25] L.A. German and A.Yu. Popov, “Operativno opredelyat’ zonu povrezhdeniya v otklyuchyonnoi koontaktnoi seti [Quickly identify the damage zone in the disconnected contact network]”, *Lokomotiv [Locomotive]*, vol. 1, no. 661, pp. 36-38, 2012 (in Russian).
- [26] L.A. German, V.L. German, A.V. Samorukov, A.Yu. Popov and D.S. Popov, “Up-to-date automation facilities of electrical power supply in electric traction AC network”, *Electronics and Electrical Equipment of Transport*, no. 1, pp. 6-12, 2013.
- [27] L.A. German, V.A. Korneev, A.V. Maksimov, P.A. Mureev, D.A. Kurov and M.S. Parfenov, “Tyagovaya set’ avtomatizirovana [The traction network is automated]”, *Lokomotiv [Locomotive]*, vol. 6, no. 702, pp. 41-43, 2015 (in Russian).
- [28] E.A. Arzhannikov, V.Yu. Lukoyanov and M.Sh. Misrikhanov, *Opreделение mesta korotkogo zamykaniya na vysokovoltnykh liniyah elektroperedachi [Determining the location of a short circuit on high-voltage power lines]*. Moscow: Energoatomizdat, 2003 (in Russian).

- [29] S.D. Mrykhin, D.S. Mrykhin, B.P. Peretokin and E.P. Figurnov, “Method of and device for revealing places of damaged insulation in contact system”, Patent RU 2187438, Aug. 20, 2002.
- [30] Yu.I. Zharkov, Yu.G. Semenov and M.V. Mikaelyan, “Topographic method of determining a place of short circuit in a threshold AC network”, Patent RU 2668663, Oct. 2, 2018.
- [31] W. Baldauf, B. Landwehr, B. Sarnes and G. Tiffe, “Short-circuit point detecting and locating device for pipeline facility of railway track, has transponders activated or deactivated in short-circuit region by short circuit current, which exceeds preset threshold value”, Patent DE 102006018471, Oct. 25, 2007.
- [32] A.L. Kulikov, A.A. Loskutov and P.S. Pelevin, “Principy realizatsii releinoi zashchity, osnovannoi na raspoznavanii volnovykh portretov [Principles of implementation of relay protection based on recognition of wave portraits]”, in proc. *V Int. youth forum Intellektual’nye energosistemy [Intellectual power systems]*, Oct. 09-13, 2017, Tomsk, Russia, pp. 59-63 (in Russian).
- [33] G.M. Lyovin, “Ustroistvo dlya opredeleniya rasstoyaniya do mesta povrezhdeniya kontaknoi seti [Device for determining the distance to the point of damage to the contact network]”, Patent SU 207964, Dec. 29, 1967 (in Russian).
- [34] G.M. Lyovin, “Pogreshnost’ volnovoogo metoda pri opredelenii rasstoyaniya do mesta povrezhdeniya kontaknoi seti postoyannogo toka [Error of the wave method in determining the distance to the location of fault to the DC contact network]”, *Trudy VNIIZhT [Proceedings of VNIIZhT]*, vol. 315, pp. 67–75, 1966 (in Russian).
- [35] V.N. Pupynin and M.V. Shevlyugin, “Method for determining distance from short circuit location in multi-path traction nets of alternating and direct current and device for realization of said method (variants)”, Patent RU 2237905, Oct. 10, 2004.
- [36] A. Koji and U. Tetsuo, “Failure location method, device, program, and computer-readable recording medium”, Patent JP 2005315842, Nov. 10, 2005.
- [37] A.N. Popov and R.Z. Galinurov, “Fiber optic technologies in the automatic train control systems and monitoring of railway infrastructure”, *Transport of the Urals*, vol. 3, no. 58, pp. 48-54, 2018. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-48-54
- [38] A.Yu. Efremov, “Conference WDF 2017: development of DAS technology for railways”, *Zheleznnye Dorogi Mira [Railways of the World]*, no. 11, pp. 67-74, 2017 (in Russian).
- [39] “Opredelenie mest korotkikh замыканий v tyagovykh setyah pri pomoshchi tehnologii DAS [Locating short circuits in traction networks using DAS technology]”, *Zheleznnye Dorogi Mira [Railways of the World]*, no. 12, pp. 58-63, 2017 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Куликов Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

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

Осокин Владимир Леонидович, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, г. Княгинино, Нижегородская обл., Российская Федерация.

Vladimir L. Osokin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Engineering and Economical University, Knyaginino, Nizhny Novgorod region, Russian Federation.

Леваков Дмитрий Андреевич, аспирант Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, г. Княгинино, Нижегородская обл., Российская Федерация.

Dmitriy A. Levakov, postgraduate student of the Nizhny Novgorod State Engineering and Economical University, Knyaginino, Nizhny Novgorod region, Russian Federation.

УДК 621.332:621.3.012.8

EDN HNIOEJ

ФОРМИРОВАНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Л.А. Герман

e-mail: lagerman@mail.ru

Нижегородский Институт Путей Сообщения –
филиал Приволжского Государственного Университета Путей Сообщения
Нижний Новгород, Россия

К.С. Субханвердиев

e-mail: kamilsub@mail.ru

Российский Университет Транспорта
Москва, Россия

И.П. Карпов

ORCID: [0000-0001-9520-7546](https://orcid.org/0000-0001-9520-7546) e-mail: ivankapovrzd@yandex.ru

Трансэнерго – филиал ОАО «РЖД». Горьковская дирекция по энергообеспечению
Нижний Новгород, Россия

Предложена новая схема замещения системы внешнего электроснабжения (СВЭ) тяговой сети железных дорог, в которой совместно рассматриваются система тягового и внешнего электроснабжения с использованием существующей схемы замещения тяговой сети. Главная особенность – СВЭ представлена в виде треугольника (звезды) сопротивлений высоковольтных линий, питающих смежные тяговые подстанции. Расчет параметров новой схемы замещения связан с повышенным объемом вычислений, поэтому в работе предложены упрощенные алгоритмы расчетов. Используемые алгоритмы основаны на свойствах представленной схемы СВЭ, а сопротивление взаимной связи питающих линий двух смежных тяговых подстанций определяются по сопротивлениям короткого замыкания, переданных диспетчером энергосистемы. Погрешность расчетов по упрощенным алгоритмам не превышает нескольких процентов, что подтверждает эффективность алгоритма расчета упрощенной схемы замещения. Предлагаемый алгоритм позволяет выполнить экспресс-расчеты сопротивлений СВЭ, предварительно оценить параметры системы тягового электроснабжения при проектных расчетах.

Ключевые слова: внешнее электроснабжение, погрешность расчета, схема замещения, сопротивление линий, схема звезды, схема треугольника, тяговая сеть, упрощенный алгоритм, экспресс-расчеты.

Для цитирования: Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Карпов И.П. Формирование схемы замещения системы электроснабжения тяговых подстанций // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 1. С. 36-39. EDN HNIOEJ

FORMATION OF EQUIVALENT CIRCUIT FOR POWER SUPPLY SYSTEM OF TRACTION SUBSTATIONS

L.A. German

e-mail: lagerman@mail.ru

Nizhny Novgorod Transport Institute – Volga State Transport University Branch
Nizhny Novgorod, Russia

K.S. Subkhanverdiev

e-mail: kamilsub@mail.ru

Russian University of Transport
Moscow, Russia

I.P. Karpov

ORCID: **0000-0001-9520-7546** e-mail: ivankapovrzd@yandex.ru

Transenergo – Branch of JSC «Russian Railways». Gorky Directorate for Energy Supply
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper proposed a new equivalent circuit for the external power supply system (EPSS) of the railway traction network where traction and external power supply systems are jointly considered using the existing equivalent circuit for the traction network. The main feature is that the EPSS is presented as a triangle (star) of resistances of high-voltage lines feeding adjacent traction substations. Calculation of the parameters of the new equivalent circuit is associated with an increased number of calculations, and simplified calculation algorithms are proposed. These algorithms are based on the properties of the proposed EPSS circuit, and the resistance of the mutual connection of the feeder lines of two adjacent traction substations is determined by the short-circuit resistances transmitted by the power system dispatcher. The calculation error does not exceed several percent using simplified algorithms, which confirms its efficiency. The proposed algorithm allows to perform express calculations of the EPSS resistances and to preliminarily evaluate the parameters of the traction power supply system during design calculations.

Keywords: external power supply, calculation error, equivalent circuit, line resistance, star circuit, delta circuit, traction network, simplified algorithm, express calculations.

For citation: L.A. German, K.S. Subkhanverdiev and I.P. Karpov, “Formation of equivalent circuit for power supply system of traction substations”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 36-49, 2025. EDN HNI0EJ

I. Введение

В [1-3] разработана новая схема замещения системы внешнего электроснабжения (СВЭ) тяговых подстанций (ТП), позволяющая уточнить расчеты тяговых сетей. Задача статьи состоит в формировании полной схемы

замещения систем тягового электроснабжения совместно с СВЭ. Кроме того, в зависимости от задачи расчета, параметры схемы замещения предлагается рассчитывать по полному или упрощенному алгоритму. Тем самым авторы продолжают поиск новых рациональных решений, призванных автоматизировать процессы функционирования и технического обслуживания электротехнического комплекса тягового электроснабжения [3].

Впервые в [1, 4] указана методическая погрешность нормативного метода расчета сопротивлений СВЭ ТП, заключающаяся в том, что в нормативных документах [5, 6] принята ошибочная схема замещения СВЭ, в которой отсутствует электрическая связь питающих линий 110(220) кВ смежных ТП. В [7, 8] указано, что в течение многих десятков лет принималось условие, что каждая из ТП получает питание от независимой СВЭ, не связанной какими-либо высоковольтными линиями со смежными ТП. Ошибочность схемы замещения СВЭ в нормативном документе подтверждалось в [9]. В действительности, как правило, группа ТП получает питание от одной и той же трехфазной высоковольтной линии продольного электроснабжения (ВЛПЭ). Это обстоятельство приводит к перераспределению токов короткого замыкания (КЗ) между смежными ТП и, что крайне неблагоприятно для защиты, уменьшению на десятки процентов [2, 3] значения этого тока при удаленных повреждениях, что недопустимо. Кроме того, в нормативных документах существует неопределенность в выборе расчетного напряжения на шинах ТП.

II. Полная схема замещения электроснабжения тяговых подстанций

В [1, 2] предложена новая схема замещения, исключая указанные недостатки путем введения электрической связи между питающими линиями смежных ТП и введения одного источника питания в системе СВЭ вместо двух по нормативным документам (рис. 1).

В схеме замещения по рис. 1 введена линия 110 (220) кВ с сопротивлением $X_{i,j}$, соединяющая вводы смежных ТП i и j . Тем самым сформирован треугольник Δ_{ij} сопротивлений X_{0i} , X_{0j} и $X_{i,j}$ СВЭ питания двух смежных подстанций, подсоединенных к рассматриваемой межподстанционной зоне (МПЗ). На рис. 1 X_{0i} , X_{0j} – линии 110(220) кВ, питающие смежные подстанции.

Таким образом, в соответствии с [1] схема замещения представляет треугольник сопротивлений Δ_{ij} СВЭ со значениями сопротивлений КЗ в точках i и j (X_{ci} и X_{cj}).

Региональное диспетчерское управление (РДУ) энергосистемы для расчетов системы тягового электроснабжения выдает значения сопротивления трехфазного КЗ на вводах смежных тяговых подстанций ТП1 и ТП2 X_{c1} и X_{c2} , питающих одну МПЗ.

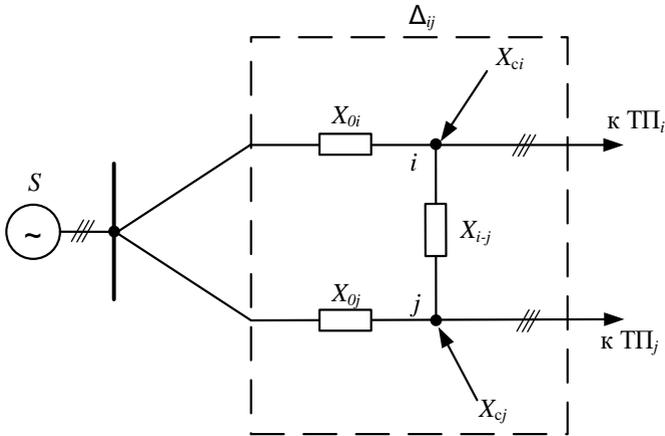


Рис. 1. Схема замещения СВЭ смежных тяговых подстанций ТП_i и ТП_j

Fig. 1. Equivalent circuit diagram of the adjacent traction substations ТП_i and ТП_j

Как пример, для схемы электроснабжения на рис. 2 покажем формирование схемы замещения СВЭ между ТП1 и ТП2 (узлы 1 и 2). Участок линии 1-2 отображается на схеме сопротивлением X_{1-2} , а сопротивления питающих линий – X_{01} и X_{02} .

Обычно для проведения расчетов треугольник сопротивлений СВЭ преобразуют в звезду сопротивлений (рис. 3) [1].

Из [10, 11] по рис. 3 запишем (обозначая X_{1-2} как X_{03}):

$$X_{01} = X_1 + X_3 + \frac{X_1 \cdot X_3}{X_2}; \quad (1)$$

$$X_{02} = X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_3}; \quad (2)$$

$$X_{03} = X_3 + X_2 + \frac{X_3 \cdot X_2}{X_1}; \quad (3)$$

$$\text{и } X_{c1} = \frac{X_{01} \cdot (X_{02} + X_{03})}{X_{01} + X_{02} + X_{03}}; \quad (4)$$

$$X_{c2} = \frac{X_{02} \cdot (X_{01} + X_{03})}{X_{01} + X_{02} + X_{03}}. \quad (5)$$

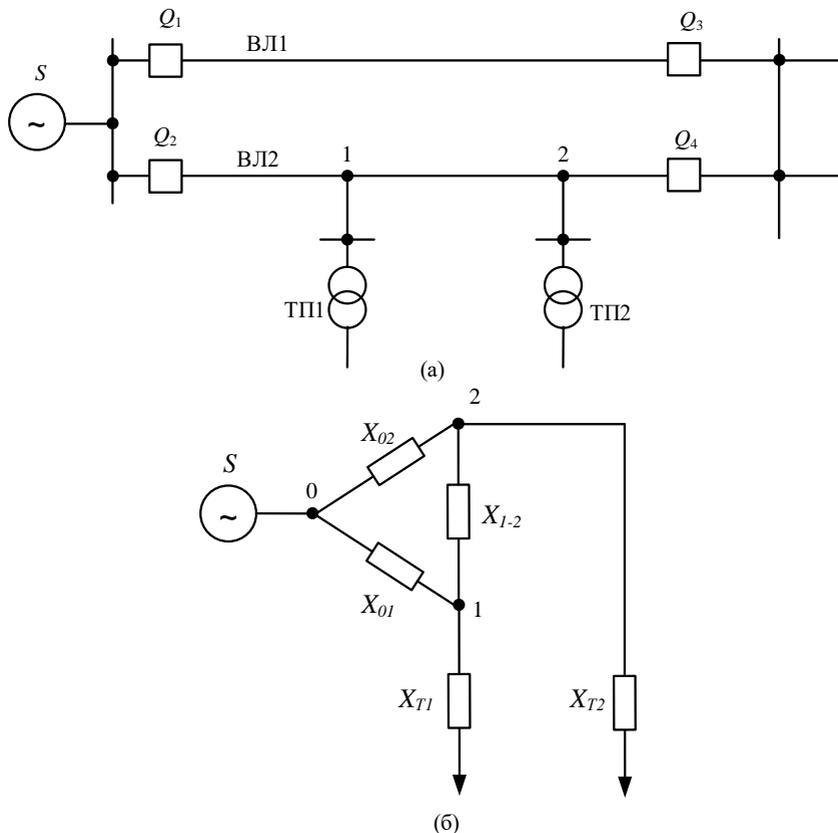


Рис. 2. Схема электроснабжения (а) и ее схема замещения (б)

Fig. 2. Power supply circuit (a) and its equivalent circuit (b)

На рис. 3 X_{c1} и X_{c2} обозначают сопротивление трехфазного КЗ в точках с1 и с2, переданные РДУ энергосистемы.

Зная X_{c1} , X_{c2} и X_{03} (X_{1-2}) из (4) и (5) формируем систему квадратных уравнений для определения X_{01} и X_{02} . Процедура расчетов X_{01} и X_{02} подробно рассмотрена в [1].

Из [10] сопротивления X_1 , X_2 , X_3 определяются по известным X_{01} , X_{02} , X_{03} :

$$X_1 = \frac{X_{01} \cdot X_{02}}{X_{01} + X_{02} + X_{03}}; \quad (6)$$

$$X_2 = \frac{X_{01} \cdot X_{03}}{X_{01} + X_{02} + X_{03}}; \quad (7)$$

$$X_3 = \frac{X_{02} \cdot X_{03}}{X_{01} + X_{02} + X_{03}}. \quad (8)$$

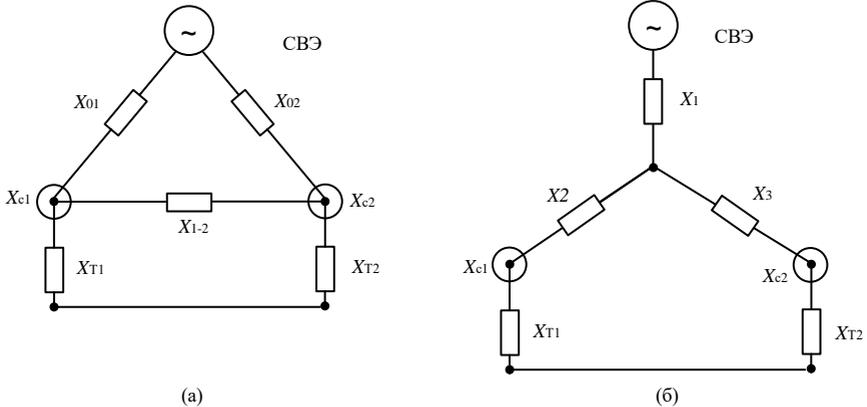


Рис. 3. Преобразование СВЭ из треугольника (а) в звезду (б)

Fig. 3. Transformation of the external power supply system from delta (a) to star (b)

III. Параметры СВЭ существующих схем тягового электроснабжения

Выполнен анализ СВЭ схем тягового электроснабжения Горьковской железной дороги (всего 49 ТП). Диапазон трехфазных сопротивлений КЗ на вводах тяговых трансформаторов, переданных от РДУ энергосистемы, представлен в табл. 1.

Таблица 1.
Сопротивления КЗ СВЭ

Table 1.
Short-circuit resistances of the external power supply system

| Диапазон сопротивлений КЗ, Ом | Число ТП, шт. |
|-------------------------------|---------------|
| от 0,1 до 0,52 (1) | 26 |
| от 0,53 (1,07) до 0,94 (1,62) | 13 |
| от 0,95 (1,64) до 1,75 (3,02) | 9 |
| 2,49 | 1 |

Параметры сопротивлений СВЭ могут свидетельствовать о необходимости введения устройств повышения качества электроэнергии в тяговой сети. В частности, считаем, что для ТП в диапазоне сопротивлений СВЭ

0,53...0,94 Ом, работающих на скоростном участке Владимир–Н. Новгород Горьковской железной дороги, следует запланировать установку устройств, повышающих уровень напряжения на ТП (например, установки продольной и поперечной емкостной компенсации [12]). Для ТП с сопротивлениями СВЭ выше 0,95 Ом по всей Горьковской железной дороги следует предусмотреть указанные устройства повышения уровня напряжения.

Из (6) следует, что с увеличением сопротивления X_{03} (X_{1-2}) уменьшается сопротивление X_1 в схеме замещения «звезда» (рис. 3, б), и при $X_{03} = \infty$ сопротивление $X_1 = 0$. Это значит, что в этом случае нет электрического соединения двух питающих линий ТП. Сопротивление X_{03} (X_{1-2}) определяется следующим образом:

$$X_{03} = 1,1 \cdot 0,4 \cdot \frac{L}{k^2}, \quad (9)$$

где 1,1 – коэффициент, учитывающий непрямолнейность трассы высоковольтной линии ВЛ-110 кВ; 0,4 Ом/км – погонное сопротивление ВЛ-110 кВ; L – длина линии ВЛ-110 кВ, соединяющей вводы 110 кВ смежных подстанций; k – коэффициент трансформации тяговых трансформаторов:

$$k = \frac{110}{27,5 \cdot \sqrt{3}}.$$

IV. Основное свойство схемы замещения СВЭ

Новая схема замещения СВЭ рассмотрена в работах [1, 2]. Представленные соотношения (1)-(5) формируют откорректированную новую схему замещения [2] (рис. 4), где СТЭ – система тягового электроснабжения.

Докажем, что значения сопротивлений КЗ СВЭ X_{c1} и X_{c2} , переданные РДУ энергосистемы, равны:

$$X_{c1} = X_1 + X_2; \quad (10)$$

$$X_{c2} = X_1 + X_3. \quad (11)$$

Подставив значения (1)-(3) в (4) и (5), получим значения X_{c1} и X_{c2} по (10) и (11), которые используем в дальнейших расчетах и при формировании упрощенной схемы замещения СВЭ.

Соотношения (10) и (11) характеризуют основное свойство (ОС) новой схемы замещения, при котором сопротивление СВЭ по мощности трехфазных КЗ на вводах трансформаторов смежных ТП, переданной энергосистемой, равно сумме сопротивлений $X_1 + X_2$ на вводе ТП1 схемы замещения «звезда» и сумме сопротивлений $X_1 + X_3$ на вводе ТП2.

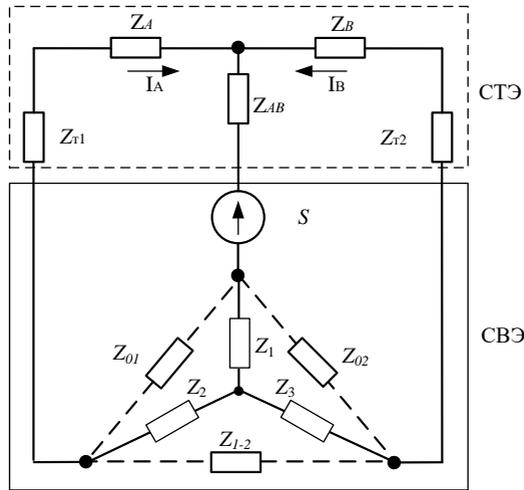


Рис. 4. Полная схема замещения системы тягового электроснабжения МПЗ

Fig. 4. Complete equivalent circuit of the traction power supply system of the inter-substation zone

V. Совместная схема замещения СТЭ и СВЭ

Для формирования полной схемы замещения (рис. 4) воспользуемся схемой замещения СТЭ из [13]. К схеме замещения СТЭ прибавим схему замещения СВЭ по разработкам в [1].

По аналогии с [13] все элементы обозначим комплексными сопротивлениями Z , однако в соответствии с [14] все расчеты будем производить для высоковольтных линий ВЛ-110(220) кВ и тяговых трансформаторов с их индуктивными сопротивлениями. СВЭ представляем в схеме «звезда» для проведения расчетов. Так как Z_1 соединено последовательно с Z_{AB} , то в расчетах к Z_{AB} прибавляем Z_1 и далее принимаем сумму $(Z_{AB} + Z_1)$, аналогично $(Z_{T1} + Z_2)$ и $(Z_{T2} + Z_3)$.

Окончательно получим в соответствие с полной схемой замещения (рис. 4) и по аналогии с нормативами [5, 13] токи КЗ:

$$I_A = \frac{U_s}{(Z_A + Z_{T1} + Z_1) + (Z_{AB} + Z_1) + \left(1 + \frac{Z_A + Z_{T1} + Z_1}{Z_B + Z_{T2} + Z_3}\right)}; \quad (12)$$

$$I_A = \frac{U_S}{(Z_B + Z_{T2} + Z_3) + (Z_{AB} + Z_1) + \left(1 + \frac{Z_B + Z_{T2} + Z_3}{Z_A + Z_{T1} + Z_2}\right)}, \quad (13)$$

где U_S – напряжение источника питания S ; Z_A, Z_B – сопротивления участков тяговой сети от ТП до места КЗ; Z_{T1}, Z_{T2} – сопротивления тяговых трансформаторов; Z_{AB} – сопротивление цепи КЗ от контактной сети

Итак, порядок расчетов по новой схеме замещения следующий:

1) формируются параметры новой схемы замещения с треугольником и предполагаемой преобразованной звезды сопротивлений СВЭ;

2) составляются квадратные уравнения для расчета сопротивлений от источника питания СВЭ до смежных ТП;

3) решаются квадратные уравнения и определяются сопротивления линий от источников питания;

4) рассчитываются параметры звезды сопротивлений;

5) рассчитываются сопротивления смежных ТП;

6) определяются токи КЗ в тяговой сети.

VI. Упрощенная схема замещения СВЭ и расчет ее параметров

Расчет параметров схемы замещения выполнен в [1]. Выше был показан объем расчетов по параметрам схемы замещения, где наиболее существенный раздел – формирование и расчет квадратных уравнений. Задача статьи – рассмотреть возможность упрощения расчетов новой схемы замещения путем исключения формирования и расчета квадратных уравнений. Задача решается путем выполнения приближенного решения с заменой значения $X_{вл1}$ на X_{c1} и $X_{вл2}$ на X_{c2} . Возможность указанной замены обоснована двумя фактами. Действительно, во-первых, практические расчеты показывают на близость результатов по расчету взаимного сопротивления питающих линий при указанных заменах (сравните X_1 и $X_{1п}$). Во-вторых, в приближенных расчетах учитываем ОС схемы замещения СВЭ, выраженное в (10) и (11). Погрешность приближенных расчетов проверяем путем выполнения реальных поверочных расчетов системы электроснабжения.

Далее рассмотрим два варианта приближенных расчетов СВЭ. В качестве примера представим формирование параметров схемы замещения СВЭ двух смежных ТП Горьковской железной дороги по данным сопротивлений КЗ от энергосистемы (табл. 2 точный расчет): для ТП Керженец – $X_{c1} = 1,33$ Ом, для ТП Быструха – $X_{c2} = 1,93$ Ом (приведено к напряжению 27,5 кВ). Сопротивление, приведенное к напряжению тяговой обмотки ($k^2 = 5,3$) $X_{1-2} = 3,8$ Ом. Схема КЗ представлена на рис. 5. По расчетным данным X_1, X_2, X_3 (рис. 3) получены I_A, I_B и суммарный I_{Σ} .

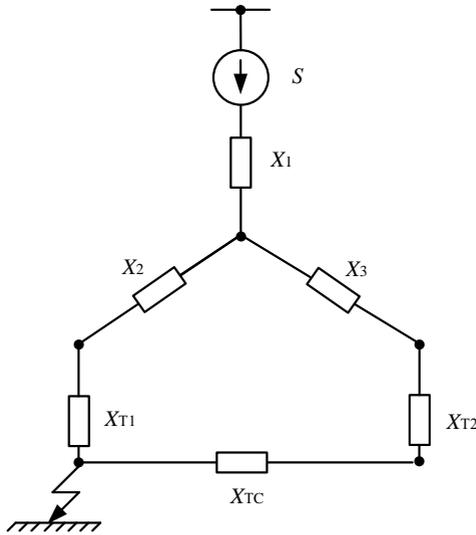


Рис. 5. Схема КЗ

Fig. 5. Short circuit diagram

Принимая $X_{вл1} = X_{c1}$, $X_{вл2} = X_{c2}$, $X_{тс} = 20$ Ом и с учетом рассчитанного $X_{1п} = X_{c1}X_{c2} / (X_{c1} + X_{c2} + X_{1-2})$ (рис. 3) выполняется расчет $X_{1п}$ (где индекс «п» указывает на приближенные значения). Учитывая, что $X_{1-2} = X_{т1} + X_{т2} + X_{тс}$ рассчитываются $X_{2п}$ и $X_{3п}$. Приближенные значения сопротивлений равны:

$$X_{1п} = \frac{X_{c1} \cdot X_{c2}}{X_{c1} + X_{c2} + X_{1-2}}; \quad (14)$$

$$X_{2п} = \frac{X_{c1} \cdot X_{1-2}}{X_{c1} + X_{c2} + X_{1-2}}; \quad (15)$$

$$X_{3п} = \frac{X_{c2} \cdot X_{1-2}}{X_{c1} + X_{c2} + X_{1-2}}. \quad (16)$$

1 вариант расчета П1. Принимая $X_{вл1} = X_{c1}$, $X_{вл2} = X_{c2}$, выполняется расчет $X_{1п}$, а $X_{2п}$ и $X_{3п}$ определяются по (10) и (11).

Этот расчет показывает (в табл. 2 строка расчет П1), что погрешность указанного приближения не превышает 2,5%. Приближенный расчет позволяет выполнить экспресс-расчеты сопротивлений СВЭ и предварительно оценить параметры системы тягового электроснабжения при проектных расчетах.

В табл. 2 ток КЗ через сопротивление X_{T1} обозначен как I_{K1} , а через сопротивление $X_{T2} - I_{K2}$.

Таблица 2.
Расчеты параметров схемы СВЭ

Table 2.
Calculations of parameters of the external power supply system circuit

| Варианты расчетов | Сопротивления, Ом, питающих линий, | | Сопротивления звезды, Ом | | | Токи КЗ, кА / погрешность, % | | |
|-------------------|------------------------------------|-------------|--------------------------|-------|-------|------------------------------|--------------|--------------|
| | Вл1п | Вл2п | X_1 | X_2 | X_3 | I_{K1} | I_{K2} | I_{Σ} |
| Точный расчет | X_{c1} | X_{c2} | 0,59 | 0,74 | 1,34 | 3,97 | 0,82 | 4,79 |
| Расчет П1 | X_{c1} | X_{c2} | 0,37 | 0,96 | 1,57 | 4,31/ 2,9 | 0,94/ 14 | 4,91/ 2,5 |
| Расчет П2 | $1,3X_{c1}$ | $1,3X_{c2}$ | 0,53 | 0,8 | 1,4 | 3,99/ 0,5 | 0,83/ 1,2 | 4,83/ 0,8 |

2 вариант расчета П2. Более точный результат получается, если принять $X_{вл1п} = (1,3...1,5) \cdot X_{c1}$ и $X_{вл2п} = (1,3...1,5) \cdot X_{c2}$. Принимаем $X_{вл1п} = 1,3X_{c1}$ и $X_{вл2п} = 1,3X_{c2}$.

С учетом указанного порядок расчетов по варианту П2 следующий:

- 1) определяется приближенное значение $X_{1п}$ взаимного сопротивления питающих линий смежных подстанций по (13);
- 2) с учетом $X_{1п}$ определяются значения сопротивлений $X_{2п}$ и $X_{3п}$ по (10) и (11);
- 3) по значениям $X_{1п}$, $X_{2п}$ и $X_{3п}$ определяются токи КЗ I_A и I_B по (12) и (13).

Погрешность по предлагаемым приближенным расчетам не превышает 0,8 ... 1,2 %. Поэтому предлагается применять приближенный метод расчета по вышеуказанному алгоритму (2 вариант расчета П2).

При этом авторы повторяют мнение специалиста по эффективности инвестирования в электроэнергетику [15]: «не бояться разумных упрощений в построении инженерных расчетных моделей тех или иных явлений и процессов. В любых разделах практической электротехники объективно существуют обширные зоны неопределенностей, находить в этих условиях оптимальную модель процесса – искусство инженера».

VII. Выводы

В существующих нормативных документах допущена методическая ошибка по формированию схемы замещения СВЭ для расчетов схем тягового электроснабжения – ТП подключена к источнику питания по одной ли-

нии, хотя, как правило, она подключается к источнику питания по двум линиям. Указанное приводит к перераспределению токовой нагрузки, что определяет погрешность расчетов. В статье предложена совместная схема замещения систем внешнего и тягового электроснабжения ТП, где СВЭ представлена схемой треугольника (звездой) питающих линий ТП.

Предложенная схема замещения позволяет снизить погрешности расчетов, но появляются дополнительные расчеты при формировании и решении системы квадратных уравнений.

Для выполнения экспресс-расчетов предложен алгоритм приближенных расчетов параметров СВЭ, в соответствии с которым взаимное сопротивление питающих линий смежных ТП определяется по заданным сопротивлениям КЗ от РДУ энергосистем, а для расчета сопротивлений питающих линий ТП используется основное свойство разработанной схемы замещения СВЭ по (10) и (11). Если принять сопротивления питающих линий ТП равными 1,3...1,5 сопротивления КЗ от РДУ энергосистем и использовать разработанное ОС формирования треугольника сопротивлений СВЭ, то погрешность упрощенных расчетов сопротивления СВЭ не превышает нескольких единиц процента, что доказывает целесообразность использования упрощенных расчетов параметров СВЭ.

© Герман Л.А., 2025

© Субханвердиев К.С., 2025

© Карпов И.П., 2025

Поступила в редакцию 28.12.2024

Принята к публикации 30.01.2025

Received 28.12.2024

Accepted 30.01.2025

Библиографический список

- [1] Герман Л.А., Карпов И.П. Уточненный метод расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 2 (14). С. 15-25. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_15
- [2] Герман Л.А. Совершенствование тягового электроснабжения переменного тока для повышения пропускной способности железных дорог. М: УМЦ ЖДТ, 2024. – 192 с.
- [3] Подшивалин А.Н., Куликов А.Л. Системотехника защиты и автоматики линий электропередачи. Н. Новгород: Дятловы горы, 2024. – 332 с.
- [4] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. М.: УМЦ ЖДТ, 2021. – 208 с.
- [5] Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки: сборник СТО РЖД. Ч. 1-5. М.: ООО «Техинформ», 2019. – 304 с.
- [6] СП-224.1326000.2014. Тяговое электроснабжение железной дороги. Введ. 2014-12-01. – 85 с.

- [7] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
- [8] Бей Ю.М., Мамошин Р.Р., Пупынин В.Н., Шалимов М.Г. Тяговые подстанции. М.: Транспорт, 1986. – 319 с.
- [9] Жарков Ю.И., Попова Н.А., Фигурнов Е.П. Учет схем питания тяговых подстанций при расчетах коротких замыканий тяговой сети переменного тока // Вестник Научно-Исследовательского Института Железнодорожного Транспорта. 2019. № 78 (1). С. 10-18. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-1-10-18
- [10] Веников В.А., Глазунов А.А., Жуков Л.А., Солдаткина Л.А. Электрические системы. М.: Высшая школа, 1971. – 440 с.
- [11] Татур Т.А., Татур В.Е. Установившиеся и переходные процессы в электрических цепях. М.: Высшая школа, 2001. – 407 с.
- [12] Караев Р.И., Волобринский С.Д., Ковалев И.Н. Электрические сети и энергосистемы. М.: Транспорт, 1988. – 326 с.
- [13] Фигурнов Е.П. Релейная защита. Ч. 2. М.: УМЦ ЖДТ, 2009. – 604 с.
- [14] Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. М.: Энергия, 1979. – 152 с.
- [15] Ковалев И.Н. Электроэнергетические системы и сети. М.: УМЦ ЖДТ, 2015. – 363 с.

References

- [1] L.A. German and I.P. Karpov, “Refined method for calculating short-circuit currents in ac traction network”, *Smart Electrical Engineering*, vol. 2, no. 14, pp.15-25, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_15
- [2] L.A. German, *Sovershenstvovaniye tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka dlya povysheniya propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog [Improving AC traction power supply to increase railway capacity]*. Moscow: UMC ZDT, 2024 (in Russian).
- [3] A.N. Podshivalin and A.L. Kulikov, *Sistemotekhnika zashchity i avtomatiki liniy elektropereedachi [Systems technology for protection and automation of power lines]*. N. Novgorod: Dyatlovy gory, 2024 (in Russian).
- [4] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev and V.L. German, *Avtomatizatsiya elektrosnabzheniya tyagovoy seti peremennogo toka [Automation of AC traction power supply]*. Moscow: UMC ZDT, 2021 (in Russian).
- [5] *Zashchita sistem elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi ot korotkikh zamykaniy i peregruzki: sbornik STO RZD [Protection of railway power supply systems from short circuits and overload: collection of STO RZD]*. Part 1-5. Moscow: LLC «Techniform», 2019 (in Russian).
- [6] Traction power supply of the railway, SP-224.1326000.2014, Dec. 2014.
- [7] K.G. Markvardt, *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Electricity supply of electrified railways]*. Moscow: Transport, 1982 (in Russian).
- [8] Yu.M. Bey, R.R. Mamoshin, V.N. Pupynin and M.G. Shalimov, *Tyagovyye podstantsii [Traction substations]*. Moscow: Transport, 1986 (in Russian).
- [9] Yu.I. Zharkov, N.A. Popova and E.P. Figurnov, “Accounting power supply schemes for traction substations in the calculation of short circuits in the ac traction network”,

- Russian railway science journal*, vol. 78, no. 1, pp. 10-18, 2019. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-1-10-18
- [10] V.A. Venikov, A.A. Glazunov, L.A. Zhukov and L.A. Soldatkina, *Elektricheskie sistemy [Electrical systems]*. Moscow: Higher school, 1971 (in Russian).
- [11] T.A. Tatur and V.E. Tatur, *Ustanovivshiesya i perekhodnye processy v elektricheskikh cepyah [Steady-state and transient processes in electrical circuits]*. Moscow: Higher school, 2001 (in Russian).
- [12] R.I. Karaev, S.D. Volobrinский and I.N. Kovalev, *Elektricheskie seti i energosistemy [Electric Networks and Power Systems]*. Moscow: Transport, 1988 (in Russian).
- [13] E.P. Figurnov, *Releynaya zashchita. [Relay protection]. Part 2*. Moscow: UMC ZDT, 2009 (in Russian).
- [14] *Rukovodyashchie ukazaniya po relejnoj zashchite. Vyp. 11. Raschety tokov korotkogo замыкания для релеjnoj zashchity i sistemnoj avtomatiki v setyah 110-750 kV [Guidelines for relay protection. Issue 11. Calculations of short-circuit currents for relay protection and system automation in 110-750 kV networks]*. Moscow: Energiya, 1979 (in Russian).
- [15] I.N. Kovalev, *Elektroenergeticheskiye sistemy i seti [Electric power systems and networks]*. Moscow: UMC ZDT, 2015 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Герман Леонид Абрамович, доктор технических наук, профессор Нижегородского Института Путей Сообщения – филиала Приволжского Государственного Университета Путей Сообщения, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Leonid A. German, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod Transport Institute – Volga State Transport University Branch, Russian Federation.

Субханвердиев Камиль Субханвердиевич, кандидат технических наук, доцент Российского университета транспорта, г. Москва, Российская Федерация.

Kamil S. Subkhanverdiev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation.

Карпов Иван Петрович, начальник электротехнической лаборатории Горьковской дирекции по энергообеспечению, Трансэнерго – филиал ОАО «РЖД», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Ivan P. Karpov, head of the electrical engineering laboratory of the Gorky Directorate for Energy Supply, Transenergo – Branch of JSC «Russian Railways», Nizhny Novgorod, Russian Federation.

ОСОБЕННОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С ОБЪЕКТАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

А.А. Лоскутов

ORCID: 0000-0003-2228-596X e-mail: loskutov_aa@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

В условиях современной конъюнктуры рынка электроэнергии и мощности многие средние и крупные промышленные предприятия выбирают для своих систем электроснабжения собственные объекты распределенной генерации. Как правило, это газотурбинные, газопоршневые, дизельные генерирующие установки, в некоторых случаях солнечные, ветровые электрические станции инверторного включения. Собственники промышленных предприятий внедряют инновационные технические решения направленные на повышение эффективности электроснабжения и технологического процесса, связанные с использованием силовых электронных преобразователей, регуляторов напряжения на элементах силовой электроники. Промышленные потребители часто имеют нелинейную нагрузку с переменным графиком работы. Эти обстоятельства существенно отражается на изменении режимов работы систем электроснабжения промышленных потребителей, делает их сложнораспознаваемыми для устройств релейной защиты и автоматики. В статье анализируются проблемы современных систем электроснабжения с объектами распределенной генерации, особенности режимов и причины сложных выявлений аварий и мест повреждений. Предлагаются и обосновываются пути решения проблем и направления совершенствования цифровой защиты энергорайонов с промышленными потребителями.

Ключевые слова: системы электроснабжения промышленных потребителей, объект распределенной генерации, распознавание режимов, релейная защита и автоматика, имитационное моделирование, многопараметрическая защита, каналы связи, МЭК 61850.

Для цитирования: Лоскутов А.А. Особенности распознавания режимов функционирования систем электроснабжения промышленных потребителей с объектами распределенной генерации // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 1. С. 50-69. EDN SHGEBY

SPECIFIC FEATURES OF RECOGNIZING MODES FUNCTIONING OF POWER SUPPLY SYSTEMS FOR INDUSTRIAL CONSUMERS WITH DISTRIBUTED GENERATION FACILITIES

A.A. Loskutov

ORCID: **0000-0003-2228-596X** e-mail: **loskutov.nnov@gmail.com**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. In the current conditions of the electricity and power market, many medium and large industrial enterprises choose their own distributed generation facilities for their power supply systems. As a rule, these are gas turbine, gas piston, diesel generating units, in some cases solar, wind power plants of inverter connection. Owners of industrial enterprises implement innovative technical solutions aimed at increasing the efficiency of power supply and the technological process associated with the use of power electronic converters, voltage regulators on power electronic elements. Industrial consumers often have a non-linear load with a variable work schedule. These circumstances significantly affect the change in the operating modes of power supply systems of industrial consumers, making them difficult to recognize for relay protection and automation devices. The article analyzes the problems of modern power supply systems with distributed generation facilities, features of the modes and causes of complex detection of accidents and damage locations. The ways to solve problems and directions for improving the digital protection of energy districts with industrial consumers are proposed and substantiated.

Keywords: power supply systems for industrial consumers, distributed generation facility, mode recognition, relay protection and automation, simulation modeling, multiparameter protection, communication channels, IEC 61850.

For citation: A.A. Loskutov, "Specific features of recognizing modes functioning of power supply systems for industrial consumers with distributed generation facilities", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 50-69, 2025. EDN SHGEBY

I. Введение

Развитие экономики, производства и современных технологий во многих странах мира вызывает потребность в увеличении потребляемой электрической энергии и мощности. По экспертным оценкам, до 2036 г. стоит ожидать изменения в энергосистеме России и, в частности, в системах электроснабжения промышленных потребителей (СЭПП), связанных с децентрализацией и цифровизацией. В соответствии с [1], а также Проектом генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2042 года, планируется введение большого объема генерирующего оборудования на

базе распределенной генерации (газотурбинные, газопоршневые, дизельные генерирующие установки) и возобновляемых источников (солнечные, ветровые) энергии (ВИЭ): 4,5 ГВт до 2030 г., 14 ГВт до 2036 г., 19 ГВт до 2042 г. [2]. По прогнозу агентства *IRENA* к 2030 году ежегодный мировой прирост электроэнергетических мощностей, на базе ВИЭ, будет составлять 1000 ГВт [2, 3]. При этом, по данным наблюдений, объектами внедрения данных источников являются чаще всего средние и крупные промышленные предприятия, где требуются новые электрические мощности и обеспечение непрерывного, надежного электроснабжения.

Технология распределенной генерации (РГ) набирает популярность в связи с постоянно растущим спросом на энергию, истощение ресурсов ископаемого топлива и ориентацией на чистую энергию. Размещение объектов РГ (ОРГ) целесообразно выбирать по возможности в близости от узлов электропотребления с интеграцией в распределительные сети до 110 кВ, образуя при этом энергорайоны. Установка ОРГ в СЭПП изменяет ее поведение, позволяя использовать преимущественно меньших по размеру и более гибких ресурсов. Таким образом, привычные условия работы распределительной электрической сети 6-110 кВ с ОРГ изменяются и становятся более сложными, что влияет на распознавание аварийных и нормальных режимов работы и, как следствие сказывается на эффективности работы устройств релейной защиты и автоматики (РЗА).

Статья посвящена анализу проблем и тенденций, связанных с распознаванием режимов СЭПП с промышленными и бытовыми потребителями. Приводится обзор современных решений, предложенных в отечественной и мировой технической литературе. Предлагается концептуальный вариант развития цифровой защиты и автоматики для СЭПП, имеющий два независимых уровня, соответствующих традиционному подходу к РЗА.

II. Особенности режимов работы систем электроснабжения промышленных потребителей с объектами распределенной генерации

В России организация СЭПП и энергорайонов с ОРГ получила распространение на крупных промышленных предприятиях, в сельских районах с гражданской инфраструктурой, объектах нефтяной и газовой отрасли, в местах добычи полезных ископаемых, где в качестве основных источников РГ используются газотурбинные (ГТУ), газопоршневые (ГПУ) и дизельные (ДГУ) генерирующие установки (ГУ).

На рис. 1 представлен пример электрической схемы СЭПП с ОРГ для нефтегазодобывающей компаний. Схема включает три ОРГ мощностью до 25МВА, подключенных на напряжение 10 кВ, способных работать, как в островном режиме, так и параллельно с электроэнергетической системой (ЭЭС). Схема электроснабжения имеет три класса напряжения: 220 кВ, 110 кВ, 10 кВ.

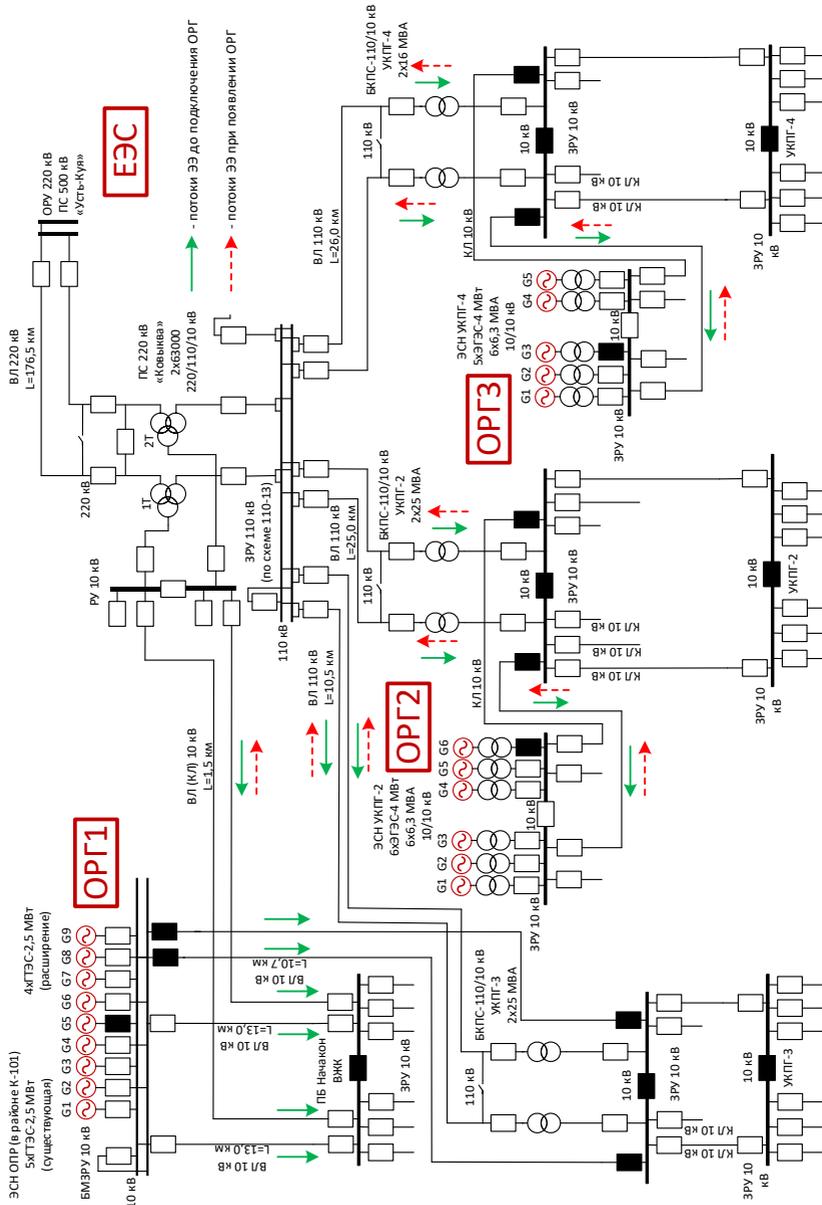


Рис. 1. Пример электрической схемы СЭП с ОРГ газодобывающей компании

Fig. 1. An example of an electrical circuit diagram of an industrial consumer's power supply system with distributed generation facilities

Соединение энергорайона с централизованной ЭЭС происходит через ПС 220/110/10 кВ, а ОРГ подключены к секциям шин РУ 10 кВ распределительных понизительных ПС 110/10 кВ. Помимо ОРГ с ГТУ, схема энергорайона имеет широкий перечень элементов: воздушные линии электропередачи (ЛЭП) 10-220 кВ, КЛ 10 кВ, автотрансформаторы 220/110/10 кВ, трансформаторы 110/10 кВ, выключатели 220 кВ, 110 кВ, 10 кВ, РУ с секциями шин 10 кВ, 110 кВ, 220 кВ и другое оборудование. Каждый из этих элементов имеет свои особенности работы, технологический режим, подвержен повреждениям и требует индивидуального подхода к организации защиты и автоматики. Топология СЭПП может меняться и переключение режимов работы происходит посредством коммутации соответствующих выключателей.

Несмотря на свою перспективность, применение ОРГ порождает в энергорайонах не характерные для классической распределительной сети сложные электрические режимы. При анализе режимов работы СЭПП с ОРГ следует принимать во внимание следующие аспекты.

Контроль и управление напряжением и частотой

В СЭПП генерируемая активная и реактивная мощность должны быть в сбалансированном состоянии с потребляемой нагрузкой, учитывая потери в ЛЭП. Дисбаланс выработки и потребления мощности в СЭПП вызывает отклонение промышленной частоты (50 Гц) от нормируемого значения по ГОСТ 32144-2013. Контроль и управление напряжением и частотой обеспечивает нормируемое их значение путем регулирования активной и реактивной мощности, вырабатываемой или потребляемой. Особенностью режимов работы СЭПП является возможность работы нескольких ОРГ в островном режиме. Важным является регулирование напряжения во время работы сети с использованием зависимости напряжения от реактивной мощности. Каждый источник РГ имеет собственную характеристику падения частоты сети во время изолированной работы. Актуален вопрос регулирования частоты, поскольку для многих ОРГ, особенно СЭС и ВЭС с инверторным включением несвойственно наличие инерционного отклика и значительного резерва по активной мощности. Для СЭПП с такими ОРГ наблюдается увеличение скорости изменения частоты (df/dt) и величины максимального его отклонения [4]. Причем увеличение доли такой несинхронной генерации приводит к увеличению скорости изменения частоты:

$$\frac{df}{dt} \sim \frac{1}{T_j / 2}, \quad (1)$$

где T_j – механическая постоянная инерции вращающихся масс турбины генератора, которая определяет время, в течение которого скорость ротора изменяется от нуля до номинальной под действием номинального избыточного момента и при постоянном моменте сопротивления:

$$T_j = \frac{2,74 \cdot GD^2 \cdot n^2}{1000 \cdot S_{\text{ном}}}, \quad (2)$$

где GD^2 – маховой момент, $\text{т} \cdot \text{м}^2$; G – масса подвижных элементов; D – диаметр подвижных масс; n – скорость вращения, об/мин; $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность генератора, кВА.

Скорость переходного процесса становится гораздо быстрее, чем в традиционных энергосистемах с высокой инерцией, что сильно влияет на работу режимной и противоаварийной автоматики, а также релейной защиты (рис. 2).

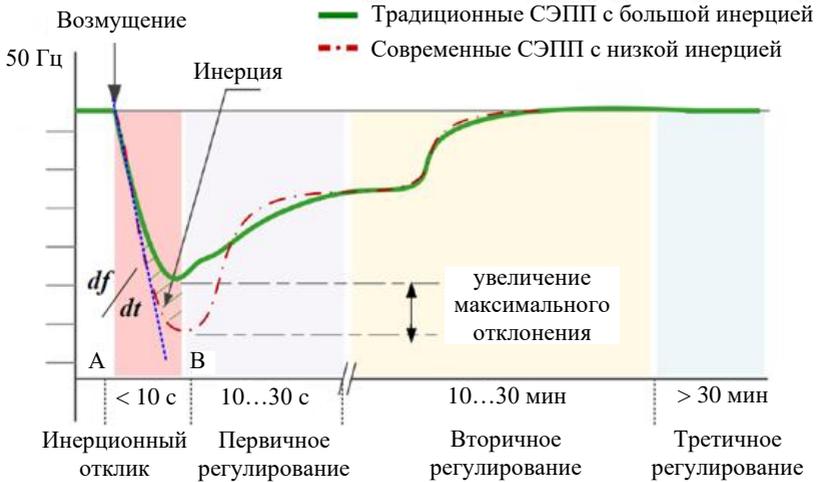


Рис. 2. Влияние инерции на скорость изменения частоты

Fig. 2. The effect of inertia on the rate of change of frequency

Для примера в некоторых странах мира скорость изменения частоты составляет более 6 Гц/с. Это, как правило, приводит к резкому отключению всех генерирующих установок и крупным авариям [4-6]. Таким образом, требуется разработка быстродействующих алгоритмов анализа параметров и принятия решения.

Дисбаланс мощности

Нарушение баланса мощности возникает во время процесса перехода от параллельной работы с сетью в изолированный (островной) режим, когда СЭПП получает часть мощности от основной ЭЭС или отдает мощность в ЭЭС до отключения. Для поддержания баланса мощности при малой инерционности некоторых генерирующих установок (например, ГПУ с небольшими значениями механической постоянной инерции $T_j = 1 \dots 2$ с) [6], а также медленного динамического отклика источников целесообразно использование накопителей электроэнергии [7]. При возвращении работы СЭПП из островного режима в режим с подключением к сети следят за тем, чтобы величина и фаза напряжений СЭПП и сети на синхронизирующем устройстве были равны. Для выполнения таких коммутаций следует использовать быстродействующий выключатель [8-10] и устройство управления выключателем соответствующей чувствительности.

Показатели качества электрической энергии

Гармонические токи, отличные от промышленной частоты и которые могут возникать в СЭПП с ОРГ (особенно при интеграции в них ВИЭ с силовыми электронными преобразователями), должны быть сокращены для снижения гармонических потерь, уменьшения помех в сетях телемеханики, исключения ложной работы релейной защиты и автоматики.

В качестве примера на рис. 3 показаны трехфазные сигналы напряжения и тока при подключении солнечной электростанции через инвертор для случая значительного затенения (~50 %) фотоэлектрических панелей [11].

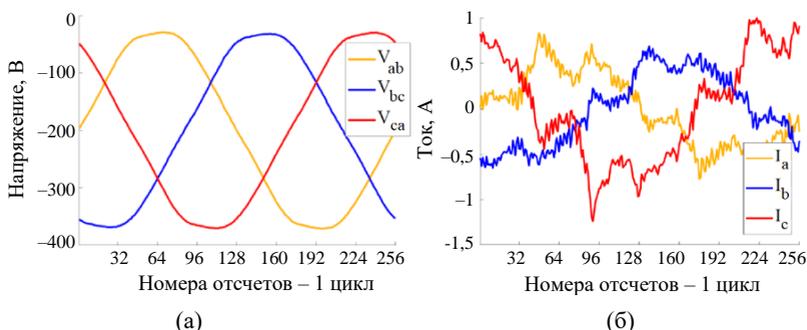
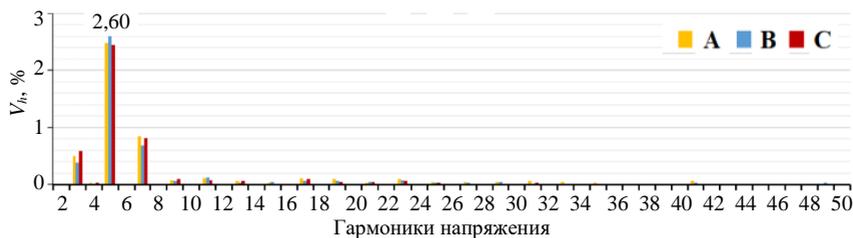


Рис. 3. Измеренное напряжение фаза-фаза (а) и фазный ток (б) в точке общего присоединения

Fig. 3. Measured phase-to-phase voltage (a) and phase current (b) at the point of common connection

Оценка сигнала напряжения (рис. 3а) показывает, что пятая гармоника составляет 2,6%, что является самым высоким среди всех остальных гармонических составляющих, не превышающих 1 % (рис. 4а).



(а)



(б)

Рис. 4. Оценка гармонического состава напряжения (а) и тока (б) [11]

Fig. 4. Evaluation of the harmonic composition of voltage (a) and current (b) [11]

Оценка гармонического состава сигнала тока (рис. 4б) показывает, что коэффициент нелинейных искажений (THD_i) равен 30,52 %. Пятая гармоническая составляющая тока для этого сценария составила самый высокий процент: 21,40 % в фазе А, 18,25 % в фазе В и 19,66 % в фазе С. Определено, что на поведение коэффициента THD_i влияет процент затенения фотоэлектрических панелей. Особенности отклонения ПКЭ проявляются в островном режиме работы СЭПП, что может повлиять на функционирование РЗА [6, 11].

Целесообразно применение методов компенсации гармоник [8, 12, 13]. Кратковременные колебания параметров режима обусловлены стохастической выработкой электроэнергии объектами ВИЭ.

Изменения в топологии сети

Из-за подключения/отключения генераторов и нагрузок, связей между узлами нагрузок, прерывистости генерации совокупности ВИЭ (солнечных, ветровых и пр.) в СЭПП и энергорайонах возможны регулярные изменения топологии сети, или схемно-режимной ситуации.

Экономические аспекты

В связи с возможностью работы в различных электрических режимах, динамичного управления, способностью интеграции разнородных источников РГ и накопителей электроэнергии, требуется обеспечение не только высокой надежности и безопасности эксплуатации оборудования, но и также коммерческой эффективности СЭПП.

Переходные процессы

В островном режиме работы СЭПП с ОРГ переходные процессы протекают значительно быстрее, что обусловлено меньшими значениями T_j (в 3...10 раз) по сравнению с крупными централизованными источниками электроэнергии. Например, на рис. 5 показано влияние постоянной инерции генератора T_j на качания после короткого замыкания (КЗ), которое происходит в СЭПП, в момент времени 70 секунд. Данные получены по результатам имитационного моделирования и подтверждаются реальными осциллограммами. При меньшем значении постоянной инерции генератора имеют место качания большей амплитуды, однако быстро затухающие из-за более легкой подвижной части генератора [14].

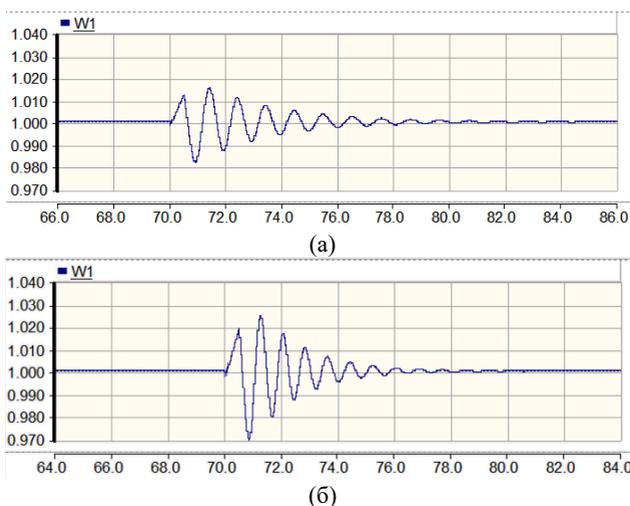


Рис. 5. График скорости вращения ротора генератора при $T_j = 8$ с (а); $T_j = 5$ с (б)

Fig. 5. Graph of the generator rotor speed at $T_j = 8$ s (a); $T_j = 5$ s (b)

Генераторы на основе двигателя внутреннего сгорания характеризуются низкой скоростью набора и сброса нагрузки, что влияет на отклонения параметров режима от нормируемых значений. Характеристики и параметры нагрузки оказывают существенное влияние на переходные процессы,

в связи с сопоставимостью суммарных мощностей ГУ и нагрузки, а также малых взаимных сопротивлений.

Устойчивость функционирования СЭПП

Наиболее часто присоединяемые ОРГ к узлам нагрузки работают в сбалансированных по нагрузке и генерации СЭПП и энергорайонах. Особенно это характерно для электроснабжения промышленных предприятий, на кустовых площадках газо- и нефтедобывающей отрасли в системах электроснабжения жилых микрорайонов. Проблема статической устойчивости возникает в случае параллельной работы ГУ с ЭЭС (рис. 6). Разного рода возмущения, возникающие в СЭПП, приводят к нарушению исходного установившегося режима и, соответственно, к колебаниям, ввиду изменения баланса мощности [14].

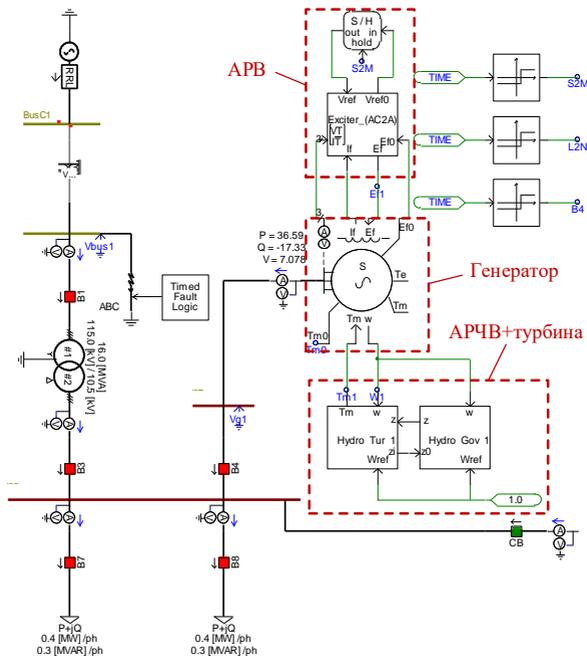


Рис. 6. Фрагмент модели СЭПП с ОРГ в PSCAD

Fig. 6. Model of the power supply system of industrial consumers with a distributed generation facility in PSCAD

Колебания роторов ГУ приводят к нарушению баланса моментов на валу турбины и электромагнитного момента ротора генератора. При этом возникают ускоряющие и тормозящие моменты на валу ГУ и, как следствие,

недопустимые отклонения параметров режима. Наличие слабых связей СЭПП с ЭЭС с низкой пропускной способностью обуславливает низкий запас статической устойчивости. Нарушение динамической устойчивости возникает в СЭПП и энергорайонах при больших возмущениях таких, как КЗ, отключение важных ЛЭП, отключение крупных блоков ГУ, не связанных с КЗ.

В качестве примера, на рис. 7 представлены осциллограммы смоделированного в PSCAD режима при возникновении непродолжительного трехфазного КЗ (длительность 0,5 с) в питающей сети 110 кВ СЭПП с ОРГ (рис. 6). Момент возникновения КЗ соответствует 70-й секунде. После непродолжительного начального переходного процесса все исследуемые величины выходят на установившееся значение. До возникновения КЗ генератор увеличивает выдаваемую активную мощность, соответственно на этом же промежутке времени активная мощность, забираемая из ЭЭС, уменьшается. В результате изменения выдаваемых генератором и системой активных мощностей угол δ плавно уменьшился до момента возникновения КЗ (70 с), что является нормой. После возникновения КЗ начинаются незатухающие колебания мощностей (P , Q), угла δ и напряжений на шинах 10 кВ.

Рассматриваемый режим является асинхронным ходом и не допустим по условию устойчивости. Таким образом, время устранения КЗ равное 0,5 с является слишком большим. Требуется обеспечение максимального быстродействия РЗА.

Функционирование релейной защиты и автоматики

Интеграция ОРГ в СЭПП приводит к изменению потоков мощности, увеличению или снижению уровня тока КЗ, меняя привычные требования к РЗА. Также ощутимо влияние различных типов источников РГ. Их совокупное воздействие создает проблемы при обеспечении чувствительности и быстродействия традиционных токовых и дистанционных защит. Плохие показатели качества ЭЭС, имеющие место в СЭПП, могут являться причиной ложных срабатываний устройств РЗА и сбоев их работе. Вопросы самовосстановления функционирования элементов СЭПП с помощью сетевой автоматики (АПВ, АВР, УРОВ) также имеют существенные отличия в различных схемно-режимных условиях ее работы. Подробный анализ проблем РЗА представлен автором в [14].

III. Организация системы защиты согласно МЭК 61850 при наличии широкополосных каналов связи

Анализ опыта решений в РЗА свидетельствует, что основные алгоритмы РЗА принципиально не изменились за последние десятилетия и, по сути, являются цифровыми аналогами электромеханических устройств [14].

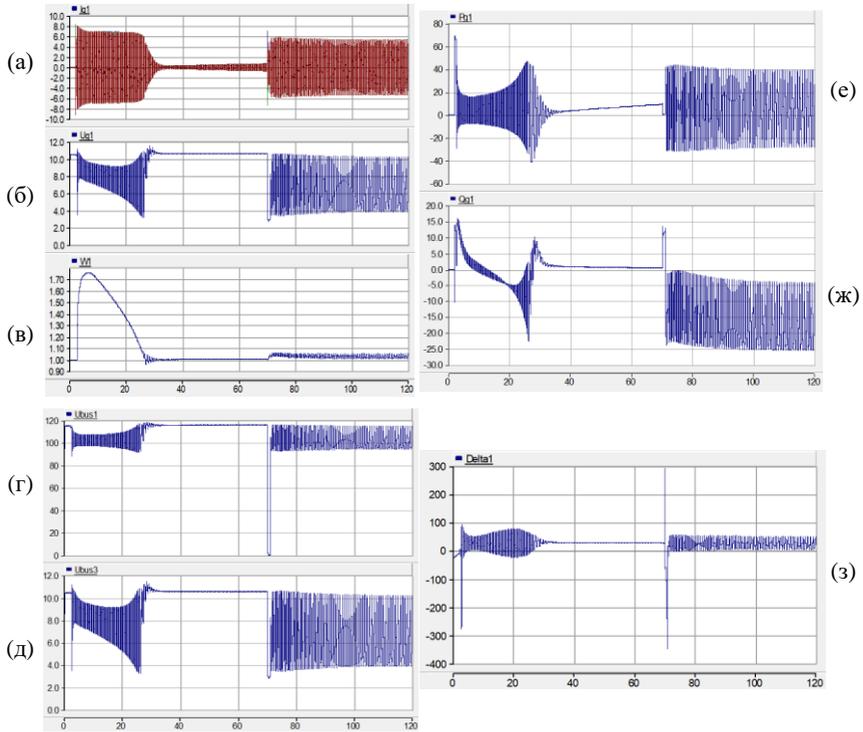


Рис. 7. Графики основных величин для смоделированного режима:
 ток на присоединении ОРГ (а); напряжение на шинах ОРГ (Bus2) (б);
 скорость вращения ротора генератора (в); напряжение на шине 110 кВ (Bus1) (г);
 напряжение на шине 10 кВ (Bus3) (д); активная мощность,
 выдаваемая генератором (е); реактивная мощность, выдаваемая генератором
 (ж); угол δ между векторами ЭДС генератора и напряжения системы (з)

Fig. 7. Graphs of the main quantities for the simulated mode:
 current at the distributed generation source connection (a); voltage on the source
 buses (Bus2) (b); generator rotor speed (c); voltage on the 110 kV (Bus1) (d);
 voltage on the 10 kV (Bus3) (e); active power generated by the generator (f);
 reactive power generated by the generator (g);
 angle δ between the vectors of the generator EMF and the system voltage (h)

На сегодняшний момент не сформирован комплексный подход к развитию системы РЗА для СЭПП в условиях изменения сетевой конъюнктуры, увеличения масштабов внедрения ВИЭ, элементов силовой электроники, ОРГ.

В то же время современные микропроцессорные устройства РЗА с поддержкой МЭК 61850 позволяют иметь доступ к большому количеству информации о защищаемом или управляемом объекте в режиме реального времени. Однако вопросы массового использования данных измерений, накопления статистических данных в узлах электрической сети, передачи мгновенных значений (*SV*-потоков) наблюдаемых параметров по каналам связи требуют глубокого изучения и проработки.

В условиях работы СЭПП, компактно находящейся на некоторой ограниченной территории, возможны варианты реализации централизованных цифровых РЗА на разных программно-аппаратных платформах, поскольку становится возможным получение синхронизированных измерений по МЭК 61850-9-2(*SV*) из разных точек электрической сети. Наличие широкополосного канала связи по волоконно-оптической линии связи дает возможность организации защиты абсолютной селективности (рис. 8).

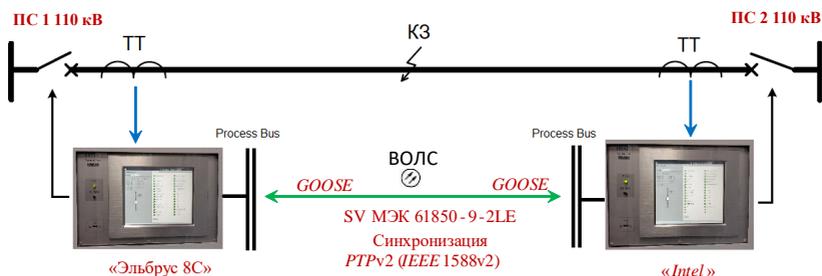


Рис. 8. Структурная схема подключения устройств РЗА на разных архитектурах

Fig. 8. Structural diagram of the connection of relay protection and automation devices on different architectures

В НГТУ совместно с промышленными партнерами, при участии автора была проведена научно-исследовательская работа по разработке опытных образцов РЗА на разных архитектурах («Эльбрус-8С» (МЦСТ) и «Intel» (x86)) с последующими лабораторными и натурными функциональными испытаниями [15]. Обмен информацией между полуккомплектами РЗА осуществлен по МЭК 61850-9-2(*SV*), что актуально для защит при внедрении ОРГ. Структурная схема подключения терминалов РЗА при опытно-промышленной эксплуатации приведена на рис. 10.

IV. Концептуальная структура цифровой РЗА для СЭПП с ОРГ

Традиционные требования к РЗА (селективность, быстродействие, чувствительность и надежность) правильно отражают ее техническое совершенство и, при этом, полностью абстрагируются от конкретных реализаций устройств и алгоритмов РЗА. Для безусловного обеспечения селективности

систему РЗА перспективной интеллектуальной СЭПП предлагается выполнять двумя независимыми уровнями, соответствующими традиционному взгляду на РЗА. В качестве основного варианта предлагаемой структуры РЗА выбран следующий (рис. 9):

1) *первый уровень* включает дифференциально-логическую защиту с использованием сети связи по МЭК 61850 [16]. Защита построена на распределенных интеллектуальных электронных устройствах (ИЭУ) всех соединений электросети. Но все ИЭУ, реализующие дифференциально-логическую РЗА, активно взаимодействуют друг с другом во всех зонах защиты, адаптируясь под топологию сети, ее режимы, при отказах элементов. Принцип обмена данными изображен на рис. 8;

2) на *втором уровне* используются многопараметрические защиты, основанные на статистических принципах [17]. Алгоритмы защиты и ее аппаратное построение аналогично традиционным ступенчатым ДЗ и МТЗ. Защита отличается от существующих ДЗ и МТЗ пусковым органом, позволяющим достигать большей чувствительности РЗА за счет использования множества измерений и произвольным выбором измеряемых параметров режима, а также возможностью использования инструмента автоматического расчета уставок, интегрированного в программно-аппаратный комплекс защиты [18].

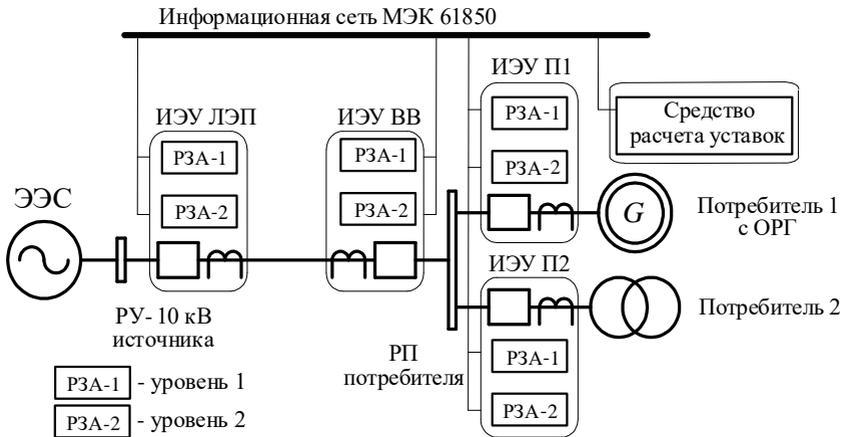


Рис. 9. Организация двухуровневой структуры интеллектуальной системы РЗА для фрагмента СЭПП с ОРГ [18]

Fig. 9. Organization of a two-level structure of an intelligent relay protection and automation system for a fragment of the power supply system with distributed generation [18]

Применение протокола МЭК 61850 позволяет непрерывно настраивать и адаптировать ИЭУ под существующие режимы работы СЭПП с помощью специализированных алгоритмов работы, расчетных и обучающих модулей. При работоспособной информационной сети, исправных трансформаторах тока, трансформаторах напряжения, интеллектуальных электронных устройствах все повреждения на участках сети будут отключаться мгновенно дифференциально-логической защитой. Резервирование реализуется многократно: и смежными выключателями дифференциально логической защиты, и ступенями многопараметрической защиты.

Под многопараметрической защитой понимается защита, использующая более чем один информационный параметр. Это не только значение тока или полного сопротивления, а целый вектор параметров, извлекаемых из мгновенных значений тока и напряжения в месте наблюдения за режимом (рис. 10) [19].

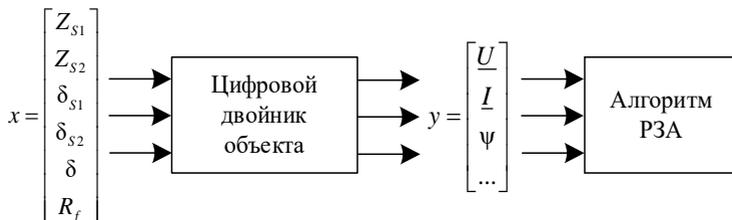


Рис. 10. Принцип использования имитационного моделирования при заданных объектных параметрах x , определяющий вектор входных параметров y для алгоритма РЗА [19]

Fig. 10. The principle of using simulation modeling for given object parameters x , determining the vector of input parameters y for the relay protection algorithm [19]

Также алгоритмы работы многопараметрической защиты используют, так называемый, информационный подход, основанный на многократном имитационном моделировании всевозможных режимов работы СЭПП с последующей статистической обработкой результатов моделирования специализированными методами [20].

V. Заключение

Современные системы электроснабжения промышленных предприятий характеризуются: использованием объектов распределенной генерации, в том числе возобновляемых источников энергии, с малыми постоянными времени; применением элементов силовой электроники; регулярными изменениями топологии распределительной сети; нелинейной промышленной нагрузкой; элементами технологического управления, критичными к отклонениям показателей качества электроэнергии и другими особенностями.

Указанные факторы существенно влияют на скорость протекания переходных процессов (до 10 раз быстрее), а также на распознавание аварийных режимов устройствами РЗА.

Для обеспечения надежного функционирования СЭПП предложена концептуальная двухуровневая структура организации цифровой РЗА, позволяющая использовать: современные каналы связи по МЭК 61850; многопараметрический подход с универсальными пусковыми органами; обучающий модуль, формирующий области существования нормальных и аварийных режимов по результатам предварительного имитационного моделирования и дообучающийся в процессе эксплуатации. Предложенная структура позволяет обеспечить лучшую распознающую способность, повысить надежность и быстродействие защиты, а также адаптироваться к изменяющимся сложнораспознаваемым режимам работы СЭПП.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00362, <https://rscf.ru/project/25-29-00362/>

© Лоскутов А.А., 2025

Поступила в редакцию 14.02.2025

Принята к публикации 28.02.2025

Received 14.02.2025

Accepted 28.02.2025

Библиографический список

- [1] Приказ Минэнерго России от 29.11.2024 г. № 2328 «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2025-2030 годы» // Официальный сайт Минэнерго России. [Электронный ресурс]. URL: https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/808/Prikaz-ME-ot-29.11.2024-_2328-ob-utverzhenii-SiPR-EES-na-2025_2030-PUBLIKATSIYA.pdf (дата обращения 01.02.2025).
- [2] Общественное обсуждение Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2042 года // Системный оператор единой энергетической системы. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.so-ups.ru/future-planning/public-discussion-genshema/2042/> (дата обращения 01.02.2025).
- [3] Годовая выработка возобновляемой электроэнергии должна вырасти в три раза к 2030 году // IRENA – International Renewable Energy Agency. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.irena.org/News/pressreleases/2023/Jun/Annual-Renewable-Power-Must-Triple-by-2030-RU> (дата обращения 01.02.2025).
- [4] Суворов А.А., Аскарлов А.Б., Рудник В.Е., Разживин И.А., Андреев М.В., Бай Ю.Д. Верификация численных расчетов электромеханических переходных процессов при оценке устойчивости электроэнергетических систем с генерирующими объектами, использующими ВИЭ // Электрические Станции. 2022. № 1 (1086). С. 25-37. DOI: 10.34831/2022.1086.1.004

- [5] Разживин И.А., Суворов А.А., Андреев М.В., Рудник В.Е., Гусев А.С. Исследование влияния синтетической инерции на динамическую устойчивость электроэнергетических систем // *Электричество*. 2022. № 8. С. 16-26. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-8-16-26
- [6] Илюшин П.В., Куликов А.Л. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией. Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. 364 с.
- [7] Нестеренко Г.Б., Армеев Д.В., Гладков Д.С., Зырянов В.М., Мячина А.В. Исследование эффективности применения системы накопления электрической энергии в составе автономной гибридной энергоустановки для регулирования частоты // *Электротехника. Передача и Распределение*. 2022. № 6 (75). С. 76-83.
- [8] Shahzad U., Kahrobaee S., Asgarpoor S. Protection of distributed generation: challenges and solutions // *Energy and Power Engineering*. 2017. № 9 (10). P. 614-653. DOI: 10.4236/epe.2017.910042
- [9] Shahzad U., Asgarpoor, S. A comprehensive review of protection schemes for distributed generation // *Energy and Power Engineering*. 2017. № 09 (08). P. 430-463. DOI: 10.4236/epe.2017.98029
- [10] Venkataramanan G., Illindala, M. Small signal dynamics of inverter interfaced distributed generation in a chain microgrid // 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007, Tampa, FL, USA: IEEE, 2007. P. 1-6. DOI: 10.1109/PES.2007.385971
- [11] Pinzon-Quintero O., Gaviria-Ospina D., Parrado-Duque A., Rodríguez-Velasquez R., Osma-Pinto G. Assessment of power quality parameters and indicators at the point of common coupling in a low voltage power grid with photovoltaic generation emulated // *Electric Power Systems Research*. 2022. № 203. P. 107679. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107679
- [12] Куликов А.Л., Илюшин П.В., Лоскутов А.А., Севостьянов А.А. Обеспечение гарантированного высокого быстродействия автоматической частотной разгрузки в условиях отклонения показателей качества электроэнергии на основе процедуры последовательного анализа Вальда // *Электрические Станции*. 2021. № 4 (1077). С. 41-50. DOI: 10.34831/EP.2021.10.77.4.007
- [13] Куликов А.Л., Севостьянов А.А., Лоскутов А.А., Илюшин П.В. Определение места повреждения воздушных ЛЭП на основе метода наименьших квадратов в условиях отклонения показателей качества электроэнергии от нормативных значений // *Энергия Единой Сети*. 2023. № 3-4 (70). С. 10-19.
- [14] Лоскутов А.А., Куликов А.Л. Современные методы формирования логической части цифровой защиты и автоматики систем электроснабжения промышленных потребителей. Н. Новгород: НГТУ, 2025. – 392 с.
- [15] Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Зинин В.М., Петров А.А. Опытнo-промышленная эксплуатация дифференциальной защиты линии с организацией информационного обмена по протоколу SV (МЭК-61850-9-2) // *Релейщик*. 2024 № 3 (50). С. 12-17.
- [16] Куликов А.Л., Шарыгин М.В. Дифференциально-логический принцип релейной защиты сетей электроснабжения // *Электрические Станции*. 2018. № 3 (1040). С. 37-46.

- [17] Лоскутов А.А., Пелевин П.С., Митрович М. Разработка логической части интеллектуальной многопараметрической релейной защиты // *Электричество*. 2020. № 5. С. 12-18. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-5-12-18
- [18] Шарыгин М.В., Куликов А.Л., Фальков А.А. Автоматизация расчета адаптивной многопараметрической релейной защиты для реконфигурируемых распределительных сетей // *Релейщик*. 2022. № 1 (42). С. 12-16.
- [19] Антонов В.И., Наумов В.А., Мартынов М.В., Мокеев А.В., Попов М.Г. Основы релейной защиты и автоматики интеллектуальной электрической сети. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 324 с.
- [20] Иванов С.В., Лямец Ю.Я. Метод информационного анализа. Ч. 2. Распознавание замыканий в заданной зоне двухцепной электропередачи // *Известия Академии Наук. Энергетика*. 2016. № 1. С. 47-57.

References

- [1] Order of the Ministry of Energy of Russia dated Nov. 29, 2024 no. 2328 “Ob utverzhdenii skhemy i programmy razvitiya elektroenergeticheskikh sistem Rossii na 2025-2030 gody [On approval of the scheme and program for the development of electric power systems of Russia for 2025-2030]”, *Official website of the Ministry of Energy of Russia*. [Online]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/?partner=19&news-item=utverzhdena-skema-i-programma-razvitiya-elektroenergeticheskikh-sistem-rossii-na-2025-2030-gody> [Accessed: Feb. 1, 2024] (in Russian).
- [2] *Obshchestvennoe obsuzhdenie General'noj skhemy razmeshcheniya ob'ektov elektroenergetiki do 2042 goda [Public discussion of the General scheme for the placement of electric power facilities until 2042]*, Russian Power System Operator. [Online]. Available at: <https://www.so-ups.ru/future-planning/public-discussion-genshema/2042/> [Accessed: Feb. 1, 2024] (in Russian).
- [3] *Annual Renewable Power Must Triple until 2030*, IRENA – International Renewable Energy Agency. [Online]. Available at: <https://www.irena.org/News/pressreleases/2023/Jun/Annual-Renewable-Power-Must-Triple-by-2030> [Accessed: Feb. 1, 2024].
- [4] A.A. Suvorov, A.B. Askarov, V.E. Rudnik, I.A. Razzhivin, M.V. Andreev and Yu.D. Bai, “Validation of numerical calculations of electromechanical transients in assessing the stability of electric power systems with generating facilities using renewable sources of energy”, *Electrical Stations*, vol. 1, no. 1086, pp. 25-37, 2022. DOI: 10.34831/2022.1086.1.004
- [5] I.A. Razzhivin, A.A. Suvorov, M.V. Andreev, V.E. Rudnik and A.S. Gusev, “Studying the influence of synthetic inertia on electric power system transient stability”, *Elektrichestvo*, no. 8, pp. 16-26, 2022. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-8-16-26
- [6] P.V. Ilyushin and A.L. Kulikov, *Avtomatika upravleniya normal'nymi i avarij-nymi rezhimami energorajonov s raspredelyonnoj generaciej [Automation of control of normal and emergency modes of power districts with distributed generation]*. Nizhny Novgorod: RANEPА, 2019 (in Russian).
- [7] G.B. Nesterenko, D.V. Armeev, D.S. Gladkov, V.M. Zyryanov and A.V. Myachina, “Efficiency analysis of electrical energy storage system as part of an autonomous hybrid power plant for frequency control”, *Electric Power. Transmission and Distribution*, vol. 6, no. 75, pp. 76-83, 2022.

- [8] U. Shahzad, S. Kahrobaee and S. Asgarpoor, "Protection of distributed generation: challenges and solutions", *Energy and Power Engineering*, vol. 9, no. 10, pp. 614-653, Sep. 2017. DOI: 10.4236/epe.2017.910042
- [9] U. Shahzad and S. Asgarpoor, "A comprehensive review of protection schemes for distributed generation", *Energy and Power Engineering*, vol. 09, no. 08, pp. 430-463, Aug. 2017. DOI: 10.4236/epe.2017.98029
- [10] G. Venkataramanan and M. Illindala, "Small signal dynamics of inverter interfaced distributed generation in a chain microgrid", in *proc. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, June 24-28, 2007, Tampa, FL, USA, pp. 1-6. DOI: 10.1109/PES.2007.385971
- [11] O. Pinzon-Quintero, D. Gaviria-Ospina, A. Parrado-Duque, R. Rodríguez-Velasquez and G. Osma-Pinto, "Assessment of power quality parameters and indicators at the point of common coupling in a low voltage power grid with photovoltaic generation emulated", *Electric Power Systems Research*, vol. 203, pp. 107679, Feb. 2022. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107679
- [12] A.L. Kulikov, P.V. Ilyushin, A.A. Loskutov and A.A. Sevostyanov, "Wald's sequential analysis to improve under frequency load-shedding performance in case of abnormal power quality indicators", *Electrical Stations*, vol. 4, no. 1077, pp. 41-50, 2021. DOI: 10.34831/EP.2021.10.77.4.007
- [13] A.L. Kulikov, A.A. Sevostyanov, A.A. Loskutov and P.V. Ilyushin, "Determining the fault location for overhead power lines based on the least squares method in conditions of deviation of power quality indicators from standard values", *Energy of Unified Grid*, vol. 3-4, no. 70, pp. 10-19, 2023.
- [14] A.A. Loskutov and A.L. Kulikov, *Sovremennyye metody formirovaniya logicheskoy chasti cifrovoy zashchity i avtomatiki sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh potrebitелей [Modern methods of forming the logical part of digital protection and automation of power supply systems of industrial consumers]*. N. Novgorod: NNSTU, 2025 (in Russian).
- [15] A.L. Kulikov, A.A. Loskutov, V.M. Zinin and A.A. Petrov, "Opytno-promyshlennaya ekspluatatsiya differencial'noj zashchity linii s organizaciej informacionnogo obmena po protokolu SV (MEK-61850-9-2) [Pilot-industrial operation of differential protection of a line with organization of information exchange according to the SV protocol (IEC-61850-9-2)]", *Relejschik [Relayman]*, vol. 3, no. 50, pp. 12-17, 2024 (in Russian).
- [16] A.L. Kulikov and M.V. Sharygin, "Differential-logic principle protection of power networks", *Electrical Stations*, vol. 3, no. 1040, pp. 37-46, 2018.
- [17] A.A. Loskutov, P.S. Pelevin and M. Mitrovich, "Development of the logic part for intelligent multiparametric relay protection", *Elektrichestvo*, no. 5, pp. 12-18, 2020. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-5-12-18
- [18] M.V. Sharygin, A.L. Kulikov and A.A. Falkov, "Automation of calculation of adaptive multi-parameter relay protection for reconfigurable distribution networks", *Relejschik [Relayman]*, vol. 1, no. 42, pp. 12-16, 2022 (in Russian).
- [19] V.I. Antonov, V.A. Naumov, M.V. Martynov, A.V. Mokeev and M.G. Popov. *Osnovy relejnoj zashchity i avtomatiki intellektual'noj elektricheskoy seti [Fundamentals of relay protection and automation of intelligent electrical networks: monograph]*. Moscow, Vologda: Infra-Engineering, 2023 (in Russian).

- [20] S.V. Ivanov and Yu.Ya. Lyamets, "Informational analysis method. P. 2. Fault identification in a given zone of double-circuit power line", *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, no. 1, pp. 47-57, 2016.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ
INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

Лоскутов Антон Алексеевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Anton A. Loskutov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

УДК 621.314.222.68::62-83::629.5.028

EDN CNRRAP

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ МОЩНОСТИ СОГЛАСУЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЯКОРНО-ШВАРТОВНОГО МЕХАНИЗМА

С. В. Попов

ORCID: 0009-0004-5274-2783 e-mail: popovsev3@ya.ru
Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия

О. А. Бурмакин

ORCID: 0009-0003-4405-7674 e-mail: boa_71@mail.ru
Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия

Ю. С. Малышев

ORCID: 0000-0001-9008-1198 e-mail: elektrikasp@mail.ru
Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия

Рассмотрены вопросы выбора установленной мощности согласующего трансформатора для питания электропривода якорно-швартовного механизма в условиях ограниченности промышленной серии электроприводов лебедок с напряжением питания 220 В. Разработана модель системы электроснабжения электропривода лебедки, включающая силовой трансформатор и судовой генератор, для исследования влияния процессов пуска электропривода на судовую сеть. Выполнено моделирование различных режимов работы электропривода лебедки и приведены результаты моделирования. Представлены диаграммы временных, электрических и механических параметров электропривода в зависимости от соотношения мощности согласующего трансформатора и электродвигателя лебедки. Проведен анализ результатов моделирования и построены сравнительные характеристики для ряда мощностей трансформаторов. Сделаны выводы и даны рекомендации по определению мощности согласующего трансформатора с учетом установленных требований к электроприводу.

Ключевые слова: качество напряжения, мощность трансформатора, переходные процессы, согласующий трансформатор, судовой электропривод, якорно-швартовный механизм.

Для цитирования: Попов С.В., Бурмакин О.А., Малышев Ю.С. Рекомендации по определению мощности согласующего трансформатора для питания электропривода якорно-швартовного механизма // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 1. С. 70-80. EDN CNRRAP

RECOMMENDATIONS FOR DETERMINING THE MATCHING TRANSFORMER POWER FOR ELECTRIC DRIVE OF ANCHOR-MOORING MECHANISM

S. V. Popov

ORCID: **0009-0004-5274-2783** e-mail: **popovsev3@ya.ru**

Volga State University of Water Transport

Nizhny Novgorod, Russia

O. A. Burmakin

ORCID: **0009-0003-4405-7674** e-mail: **boa_71@mail.ru**

Volga State University of Water Transport

Nizhny Novgorod, Russia

Y. S. Malyshev

ORCID: **0000-0001-9008-1198** e-mail: **elektrikasp@mail.ru**

Volga State University of Water Transport

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article considers the issues of selecting the installed capacity of the matching transformer for the electric drive of the anchor-mooring mechanism in conditions of limited industrial series of 220 V winch electric drives. A model of the power supply system of the winch electric drive, including a power transformer and a ship generator, has been developed to study the influence of the electric drive starting processes on the ship's network. Various operating modes of the winch electric drive have been simulated and the results are presented. Diagrams of time, electrical and mechanical parameters of the electric drive depending on the ratio of the power of the matching transformer and the winch electric motor are presented. The analysis of the simulation results is carried out and comparative characteristics are constructed for a number of transformer capacities. Conclusions are made and recommendations are given for determining the power of the matching transformer taking into account the established requirements for the electric drive.

Keywords: anchor-mooring mechanism, matching transformer, ship electric drive, transient processes, transformer power, voltage quality.

For citation: S.V. Popov, O.A. Burmakin and Y.S. Malyshev, "Recommendations for determining the matching transformer power electric drive of anchor-mooring mechanism", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 70-80, 2025. EDN CNRRAP

1. Введение

В ряде случаев, в условиях ограниченного ряда мощностей электрических лебедок, при напряжении судовой сети 220 В, для обеспечения лучших энергетических и массогабаритных показателей более рациональным является применение якорно-швартовных механизмов (ЯШМ) работающих на напряжении 380 В [1-3].

Для согласования напряжений судовой сети и питания электроприводов палубных механизмов целесообразно использовать трехфазный трансформатор. Однако падение напряжения на трансформаторе негативно влияет на работу электродвигателя лебедки. На выбор величины установленной мощности согласующего трансформатора оказывают влияние: установленные мощности судового генератора и электродвигателя лебедки, коэффициент загрузки генератора на момент включения лебедки, а также допустимые величины напряжений на электродвигателе и время его разгона.

II. Методы и материалы

С целью определения мощности электрооборудования и параметров цепей электроснабжения лебедки разработана имитационная модель. Созданная имитационная модель для решения поставленной задачи подробно описана в [1, 4]. Вычисленные в результате математического моделирования значения параметров электродвигателя ЯШМ соответствуют справочным данным, используемого в модели электрооборудования, что подтверждает адекватность модели.

В результате моделирования получены переходные электрические и механические характеристики при работе электропривода в различных режимах (рис. 1), а именно:

- пуск электродвигателя,
- разгон электродвигателя до номинальной скорости,
- остановка электродвигателя под действием момента сопротивления,
- стоянка электродвигателя под током (зацепление якоря за грунт),
- разгон электродвигателя с постепенным снижением момента нагрузки на валу (отрыв якоря от грунта) [5-7].

Моделирование выполнено с генератором мощностью 60 кВА и подключенной к нему нагрузкой мощностью 40 кВА с $\cos\varphi=0.6$.

На рис. 1 показаны диаграммы параметров электродвигателя, полученные в результате моделирования. При пуске электродвигателя ($t = 0,3$ с) (рис. 1, а) наблюдаются колебательные процессы момента (рис. 1, б), связанные с электромагнитными и электромеханическими переходными процессами в электродвигателе и упругостью механической передачи, что отражается на колебаниях тока (рис. 1, в).

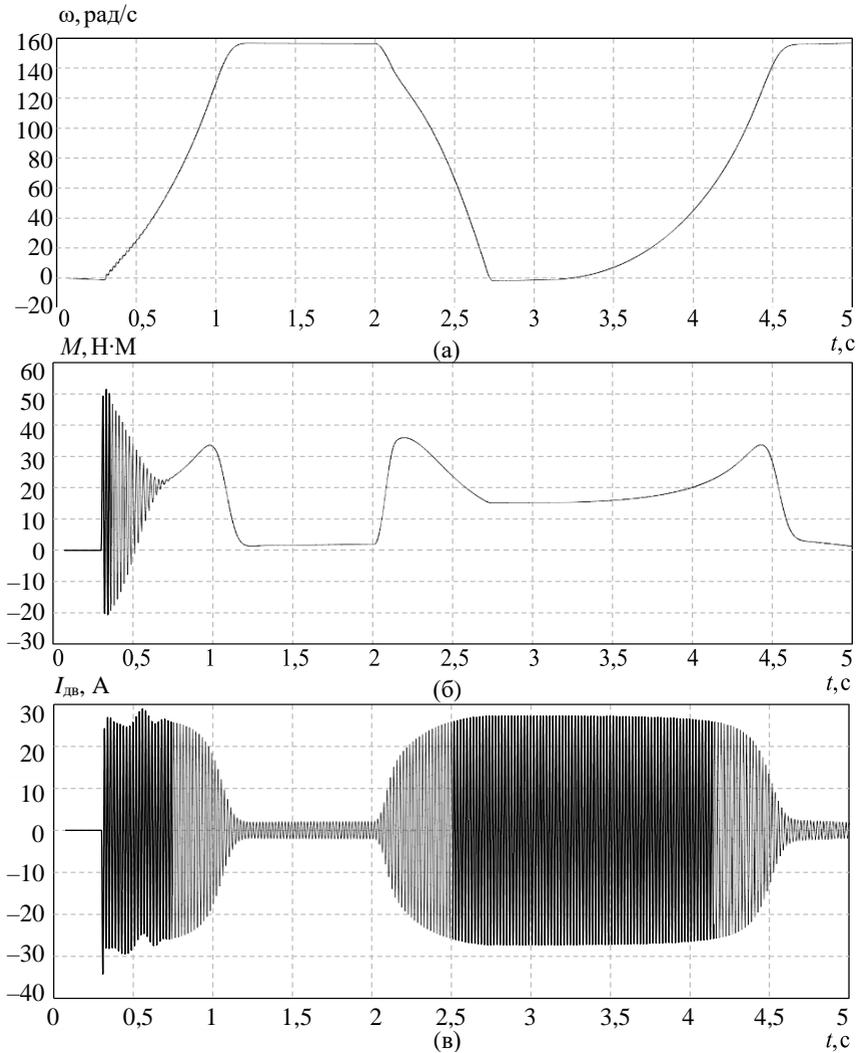


Рис. 1. Диаграммы скорости вращения (а), момента (б) и тока (в) электродвигателя ЯШМ

Fig. 1. Characteristics of rotation speed (a), torque (б) and current (в) of the electric motor of the anchor-mooring mechanism

На холостом ходу работы электродвигателя ток статора и момент на валу достигают установившихся значений ($t = 1,2$ с), а при увеличении момента сопротивления ток и момент увеличиваются. При превышении критического момента на валу электродвигателя ($t = 2,7$ с) происходит остановка электродвигателя и переход в режим стоянки под током ($t = 3,2$ с). Этот процесс характерен для якорно-швартовного механизма при отрыве якоря от грунта. Снижение момента сопротивления приводит к увеличению скорости электродвигателя до значений холостого хода ($t = 4,6$ сек.), что соответствует нагрузочной диаграмме ЯШМ.

III. Результаты

Для определения электрических и временных параметров при пуске/работе/торможении электропривода было выполнено моделирование судовой системы электроснабжения лебедки для различных соотношений мощности электродвигателя и мощности трансформатора. В результате моделирования были построены зависимости (рис. 2) для электродвигателей с номинальными мощностями 1,2 кВт (1,7 кВА) и 5 кВт (6,49 кВА).

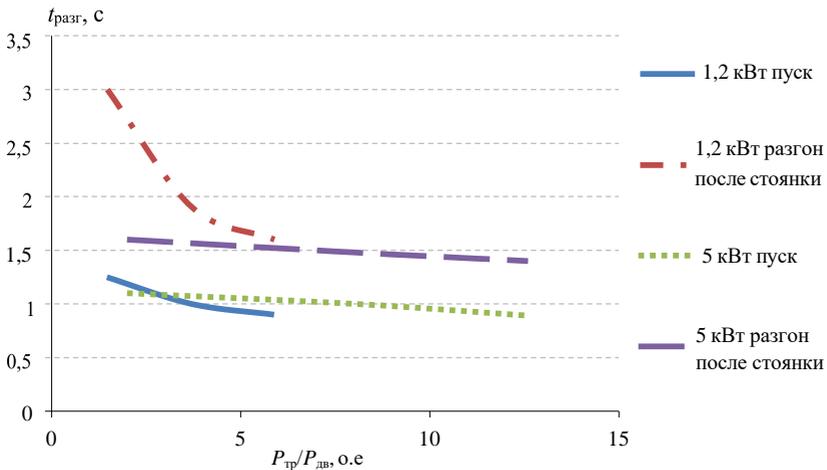


Рис. 2. Зависимость времени разгона от коэффициента соотношения мощностей трансформатора и электродвигателя ЯШМ

Fig. 2. Dependence of acceleration time on the power ratio of the transformer and the electric motor of the anchor-mooring mechanism

Следует отметить, что зависимости построены при использовании относительного параметра соотношения мощностей согласующего трансформатора $P_{тр}$ и мощности электродвигателя лебедки $P_{дв}$, что позволяет оценить их кратность – во сколько раз мощность трансформатора $P_{тр}$

должна быть больше мощности электродвигателя $P_{дв}$ для достижения желаемого времени разгона $t_{разг}$. На рис. 2 приведены зависимости времени разгона электродвигателей мощностью 1,2 и 5 кВт при пуске от трансформаторов различной мощности и при отрыве якоря от грунта после стоянки под током. При моделировании трансформатор подключается к судовой сети с заранее подсоединенным к вторичной обмотке электродвигателем. Режимы работы ЯШМ задаются нагрузочной диаграммой в настройках блока *Repeating Sequence interpolated*. Согласно диаграммам, время разгона уменьшается при увеличении мощности трансформатора относительно мощности двигателя ЯШМ, что связано с уменьшением падения напряжения на выходе трансформатора при увеличении его мощности.

Время пуска до номинальной скорости для электродвигателей 1,2 и 5 кВт без использования трансформатора составляет 0,75 с и 0,5 с, а время разгона после стоянки под током и отрыва якоря от грунта – 1,3 с и 1 с, соответственно. Таким образом, обеспечение динамических временных характеристик, идентичных бестрансформаторному электроприводу, достигается применением трансформаторов в 10 – 12 раз, превышающих мощность электродвигателя. Однако для электроприводов ЯШМ не требуется такое высокое быстродействие, поэтому коэффициент соотношения установленных мощностей трансформатора и электродвигателя может быть уменьшен.

Напряжение питания электродвигателя оказывает значительное влияние на его механические характеристики [8-10], поэтому необходимо определить значение максимального падения напряжения на обмотке статора электродвигателя. Например, исходя из правил Российского классификационного общества (РКО), допустимый кратковременный провал напряжения может составлять 20 % от номинального значения, а падение напряжения на линии питания для электродвигателей переменного тока не должно превышать 10% от номинального значения.

В результате моделирования получены зависимости падения напряжения на вторичной обмотке трансформатора при пуске предварительно загруженного до номинального значения электродвигателя и стоянке под током. На основании, которых построены кривые показывающие зависимости (рис. 3) при изменении коэффициента соотношения мощностей электродвигателя и трансформатора.

Исходя из зависимостей падения напряжения, можно сделать вывод, что для обеспечения указанных условий коэффициент соотношения мощностей трансформатора и электродвигателя будет составлять от 2 до 4-х крат, однако при увеличении мощности электропривода увеличивается падение напряжения судовой электросети, что так же следует учитывать при проектировании.

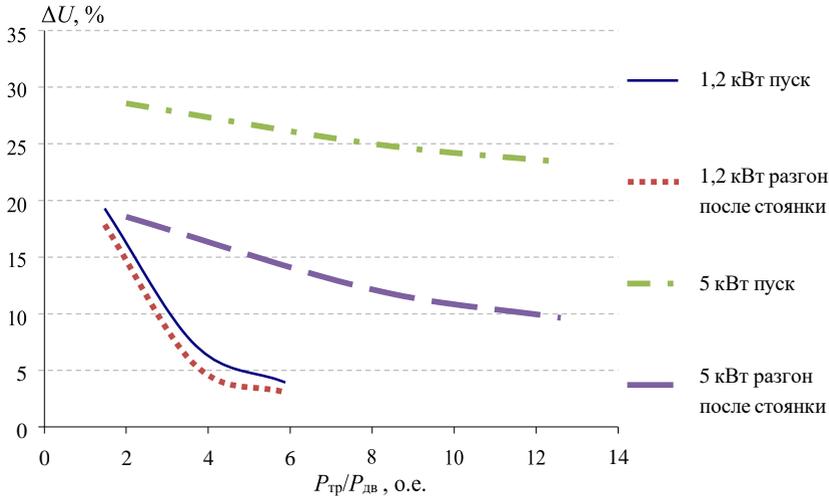


Рис. 3. Зависимость провала напряжения на вторичной обмотке трансформатора при разгоне электродвигателя от коэффициента соотношения мощностей трансформатора и электродвигателя ЯШМ

Fig. 3. Dependence of the voltage drop on the secondary winding of the transformer during acceleration of the electric motor on the power ratio of the transformer and the electric motor of the anchor-mooring mechanism

По требованиям правил РКО режим стоянки под током должен быть обеспечен в течение не менее 30 с. Стоянка под пусковым током вызывает падение напряжения на обмотках трансформатора, что приводит к необходимости завышения мощности трансформатора с целью поддержания пускового момента на валу электродвигателя в течение установленного времени [10]. Было проведено моделирование режимов стоянки электродвигателя с пусковым током для различных мощностей трансформаторов, в результате которого были построены зависимости (рис. 4). Анализ характеристик рис. 4 показал, что зависимости пускового и критического моментов от коэффициента соотношения мощностей трансформатора и двигателя в диапазоне от двух до семи крат имеют практически прямолинейный характер. При этом критический момент в указанном диапазоне возрастает на 15 %, а пусковой на 20 %, что имеет существенное значение для работы и обеспечения требуемых характеристик электропривода. При дальнейшем увеличении коэффициента соотношения мощностей трансформатора и двигателя прирост пускового и критического моментов уменьшается, что говорит о снижении влияния мощности трансформатора на момент двигателя.

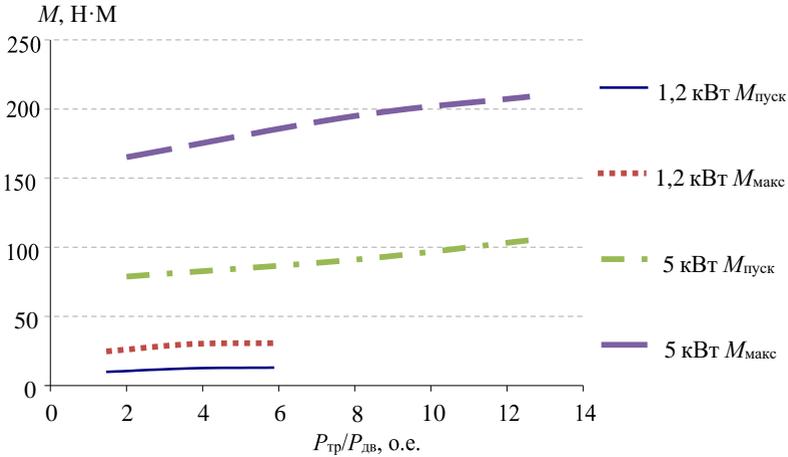


Рис. 4. Зависимость пускового и критического моментов ЭД от коэффициента соотношения мощностей трансформатора и электродвигателя ЯШМ

Fig. 4. Dependence of the starting and critical moments of the electric motor on the power ratio of the transformer and the electric motor of the anchor-mooring mechanism

IV. Заключение

Учитывая результаты моделирования, можно сделать вывод, что мощность согласующего трансформатора может быть определена исходя из требуемых критериев, как временных и тяговых с одной стороны, так и показателей качества судовой электроэнергетики с другой. Предложенные зависимости, построенные в результате варьирования различных параметров модели, могут быть полезными на практике при проектировании систем ЯШМ и выборе мощности согласующего трансформатора при установленной мощности электропривода лебедки в диапазоне от 1,2 до 5 кВт.

Особый интерес возникает при решении задачи стабилизации напряжения на электроприводе в режиме работы с заторможенным ротором и его влияние на судовую сеть. Практическую ценность результатов исследования обосновывает работу над усовершенствованием имитационной модели.

© Попов С.В., 2025

© Бурмакин О.А., 2025

© Малышев Ю.С., 2025

Поступила в редакцию 30.08.2024

Принята к публикации 12.11.2024

Received 30.08.2024

Accepted 12.11.2024

Библиографический список

- [1] Мальшев Ю.С., Бурмакин О.А., Попов С.В. Имитационная модель пусковой установки по системе трансформатор-асинхронный двигатель для якорно-швартовых механизмов // II Межд. науч.-промыш. форум «Транспорт. Горизонты развития», Июнь 07-09, 2022, Нижний Новгород, Россия. Н. Новгород: ВГУВТ, 2022. С. 30.
- [2] Бурков А.Ф., Веревкин В.Ф., Радченко П.М. Повышение энергоэффективности морского транспорта и транспортной инфраструктуры. С.-Пб.: Лань, 2019. – 132 с.
- [3] Шульга Р.Н., Петров А.Ю., Лабутин А.А. Рынки электрических машин и аппаратов: динамика и основные тенденции // РУМ. 2020. № 4 (594). С. 44-51.
- [4] Попов С.В., Бурмакин О.А., Мальшев Ю.С. Имитационная модель электропривода якорной лебедки, работающей от судовой электростанции через согласующий трансформатор, Свид. 2024662262 RU, заявл. 08.05.24; опубл. 27.05.24. – Бюл. № 6.
- [5] Правила классификации, постройки и освидетельствования судов ВВП, судов смешанного (река – море) плавания, плавучих объектов // ФАУ «Российское классификационное общество». [Электронный ресурс]. URL: <https://rfclass.ru/izdaniya-rko/pravila-klassifikatsii-postroyki-i-uriditelstvovaniya-sudov-vvp-sudov-smeshannogo-reka-more-plavaniya-plavuchikh-obektov/> (дата обращения 20.05.2024).
- [6] Бурков А.Ф. Основы теории и эксплуатации судовых электроприводов. С.-Пб.: Лань, 2023. – 340 с.
- [7] Токарев П.Н. Стоянка судна на якоре в стесненных путевых условиях // Научные проблемы водного транспорта. 2024. № 78 (1). С. 234-244. DOI: 10.37890/jwt.vi78.442
- [8] Бурков А.Ф., Нгуен В. Теоретические положения технической эксплуатации для определения надежности судовых электроприводов // Надежность и безопасность энергетики. 2023. № 16 (3). С. 184-191. DOI: 10.24223/1999-5555-2023-16-3-184-191
- [9] Бурков А.Ф., Миханошин В.В., Нгуен В.Х. Повышение энергетической эффективности асинхронных электроприводов // Электрооборудование: Эксплуатация и Ремонт. 2021. № 11. С. 7-11.
- [10] Савенко А.Е., Савенко П.С. Исследование работы мощного электропривода в автономном электротехническом комплексе // Вестник ИГЭУ. 2017. № 4. С. 44-49.

References

- [1] Yu.S. Malyshev, O.A. Burmakin and S.V. Popov, “Simulation model of the launcher according to the transformer asynchronous motor system for anchor-mooring mechanisms”, in proc. *II Int. Scientific and Industrial Forum “Transport. Development Horizons”*, Jun. 07-09, 2022, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 30.
- [2] A.F. Burkov, V.F. Verevkin and P.M. Radchenko, *Povyshenie energoeffektivnosti morskogo transporta i transportnoj infrastruktury [Improving the energy efficiency of maritime transport and transport infrastructure]*. St. Petersburg: Lan', 2019 (in Russian).

- [3] R.N. Shulga, A.Yu. Petrov and A.A. Labutin, “Rynki elektricheskix mashin i apparatov: dinamika i osnovnye tendencii [The markets of electric machines and apparatuses: dynamics and main trends]”, *RUM*, vol. 4, no. 594, pp. 44-51, 2020 (in Russian).
- [4] S.V. Popov, O.A. Burmakin and Yu.S. Malyshev, “Imitatsionnaya model' elektroprivoda yakornoj lebedki, rabotayushchey ot sudovoy elektrostantsii cherez so-glasuyushchiy transformator [Simulation model of the electric drive of an anchor winch operating from a ship power station through a matching transformer]”, Certificate RU 2024662262, May 27, 2024 (in Russian).
- [5] Pravila klassifikatsii, postroyki i osvidetel'stvovaniya sudov VVP, sudov sme-shannogo (reka-more) plavaniya, plavuchikh ob"yektov [Rules for the classification, construction and inspection of inland water navigation vessels, mixed (river-sea) navigation vessels, floating objects]. [Online]. Available at: <https://rfclass.ru/izdaniyaruko/pravila-klassifikatsii-postroyki-i-osvidetelstvovaniya-sudov-vvp-sudov-sme-shannogo-reka-more-plavaniya-plavuchikh-obektov/> [Accessed: May. 20, 2024] (in Russian).
- [6] A.F. Burkov, *Osnovy teorii i ekspluatatsii sudovykh elektroprivodov [Fundamentals of the theory and operation of ship electric drives: a textbook for universities]*. St. Petersburg: Lan', 2023 (in Russian).
- [7] P.N. Tokarev, “The anchorage in cramped travel conditions”, *Russian Journal of Water Transport*, vol. 78, no. 4, pp. 234-244, 2024. DOI: 10.37890/jwt.vi78.442
- [8] A.F. Burkov and V. Nguen, “Theoretical provisions on operation and maintenance for determining the reliability of ship electric drives”, *Safety and Reliability of Power Industry*, vol. 16, no. 3, pp. 184-191, 2023. DOI: 10.24223/1999-5555-2023-16-3-184-191
- [9] A.F. Burkov, V.V. Mikhailoshin and V.H. Nguyen, “Improving the energy efficiency of asynchronous electric drives”, *Electrical Equipment: Operation and Repair*, vol. 11, pp. 7-11, 2021.
- [10] A.E. Savenko and P.S. Savenko, “Research into powerful electric drives in the autonomous electrical power complex”, *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, vol. 4, pp. 44-49, 2017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Попов Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Sergey V. Popov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Бурмакин Олег Анатольевич, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Oleg A. Burmakin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Мальшев Юрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Yurii S. Malyshev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

УДК 621.33:621.314.54

EDN EJOYHS

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СИНХРОННОГО И АСИНХРОННОГО СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОТРЕБЛЯЕМОГО ТОКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Ю.Ю. Скороход

ORCID: 0000-0001-8192-8182 e-mail: skorohodu@yandex.ru

ООО «Трансконвертер»

Москва, Россия

Рассмотрены входные блоки высоковольтного многокаскадного преобразователя собственных нужд типа *EVB51* вагона локомотивной тяги, предназначенного для международных пассажирских перевозок. Такие входные блоки преобразовывают высоковольтное напряжение (выше 1500 В) как постоянного, так и переменного тока контактной сети в стабилизированные напряжения постоянного тока для промежуточных звеньев высоковольтного многокаскадного преобразователя. Приведена силовая схема входных блоков высоковольтного преобразователя типа *EVB51*. Исследованы пульсации входного потребляемого тока в режимах синхронного и асинхронного управления силовыми ключами рассматриваемых входных блоков. Предложено разделять входной ток на медленноменяющуюся и быстроменяющуюся составляющие. Представлены выражения для расчета составляющих входного тока преобразователя и зависимости его пульсаций от числа входных блоков в режиме синхронного и асинхронного управления силовыми ключами. Показано, что использование режима асинхронного управления силовыми ключами позволяет существенно снизить пульсации входного тока высоковольтного преобразователя. Предложены выражения для оценки коэффициента гармонических искажений входного потребляемого тока. Проведен анализ влияния числа входных блоков и режимов управления силовыми ключами на качество потребляемого тока. Показано, что коэффициент гармонических искажений входного тока практически не зависит от выходной мощности преобразователя. Наибольшее влияние на коэффициент искажения тока оказывает количество входных блоков, которые функционируют в режиме асинхронного управления силовыми ключами.

Ключевые слова: асинхронное управления, высоковольтный многокаскадный преобразователь, импульсное преобразование, качество потребляемого тока, коэффициент искажения, пульсации входного тока, синхронное управление.

Для цитирования: Скороход Ю.Ю. Анализ влияния синхронного и асинхронного способа управления на качество потребляемого тока преобразователя // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 1. С. 81-92. EDN EJOYHS

PERFORMANCE ANALYSIS OF SYNCHRONOUS AND ASYNCHRONOUS CONTROL METHODS ON QUALITY OF CURRENT CONSUMING BY CONVERTER

Y.Y. Skorokhod

ORCID: 0000-0001-8192-8182 e-mail: skorohodu@yandex.ru

Transconverter LLC

Moscow, Russia

Abstract. The article considers the input blocks of the high-voltage multi-stage auxiliary converter type EVB51 for locomotive-trailing cars intended for international passenger trains. These blocks convert the DC and AC high voltage of above 1500 V of overhead catenary network into stabilised DC voltages for intermediate blocks of high-voltage multi-stage converters. The power scheme of the input blocks of the high-voltage converter type EVB51 is presented. The ripples of the input current consumed by these input blocks in synchronous and asynchronous control modes of power switches are studied. It is proposed to recognize two components of the input current, namely fast-changing and slow-changing. The expressions for calculating the input converter current components, the dependence of input converter current ripples on the number of input blocks for synchronous and asynchronous control modes of power switches are presented. It is demonstrated that the asynchronous control of power switches allows substantially reduce the high-voltage converter input current ripples. The expressions to estimate the harmonic distortion coefficient of the input consumed current are proposed. The influence of the number of input blocks and power switch control modes on the quality of the consumed current is studied. It is demonstrated that the harmonic distortion coefficient of the input consumed current has almost no effect from the converter output power. The current harmonic distortion coefficient has the greatest impact from the number of input blocks that operate in asynchronous control mode of power switches.

Keywords: asynchronous control, high-voltage multi-stage converter, pulsed conversion, input current quality, distortion coefficient, input current ripples, synchronous control.

For citation: Y.Y. Skorokhod, "Performance analysis of synchronous and asynchronous control methods on quality of current consuming by converter", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 81-92, 2025. EDN EJOYHS

I. Введение

В современных бортовых и наземных электротехнических комплексах в качестве источников питания все чаще применяются статические преобразователи, в основе работы которых лежит импульсный способ преобразовании электрической энергии [1-3]. Использование такого способа преоб-

разования электрической энергии дает выигрыш по массогабаритным показателям, стоимости обслуживания и надежности перед другими способами преобразования энергии [4-6]. В то же время импульсное преобразование электроэнергии вызывает электромагнитные помехи, которые, например, оказывают негативное влияние на кабели связи [7, 8]. Так, на железнодорожном транспорте высоковольтные преобразователи (ВП) могут оказывать серьезное влияние на линии связи, обеспечивающих работу стрелочных переводов [9, 10]. В связи с этим содержание высших гармонических составляющих во входном токе ВП строго регламентировано [11, 12].

В статье рассмотрен ВП типа *EVB51* производства *Siemens AG* и ООО «Трансконвертер», предназначенный для пассажирских вагоном модели 61-4476 *RIC* (*Siemens AG*, Вена). Он способен функционировать при пяти различных типах напряжения: – 1000 В, – 3000 В, 1 ~ 50 Гц 1000 В, 1 ~ 50 Гц 1500 В, 1 ~ 50 Гц, 3000 В, имеющие место в контактной сети на железных дорогах России и Европейского союза [12, 13]. Конструктивно преобразователь *EVB51* представляет собой ящик (рис. 1), который устанавливается под пассажирским вагоном.



Рис. 1. Преобразователь *EVB51*

Fig. 1. *EVB51* converter

Структурно рассматриваемый преобразователь содержит четыре последовательно соединенных входных блока, которые отвечают как за стабилизацию напряжения промежуточных звеньев постоянного тока, так и за качество потребляемого тока ВП. Как уже отмечалось, на железнодорожном транспорте к содержанию высших гармонических составляющих во входном потребляемом токе ВП предъявляются особенно повышенные требования, не выполнение которых может привести к несанкционированному срабатыванию стрелочных переводов и семафоров на железнодорожных путях. В связи с этим были проведены исследования влияния различных режимов управления силовыми ключами и количества входных блоков ВП на качество потребляемого тока.

II. Исследование пульсаций входного тока

Схемотехнически входной блок рассматриваемого ВП представляет собой импульсный преобразователь переменного/постоянного тока в постоянный, на входе которого установлен внешний дроссель $L1$ (рис. 2).

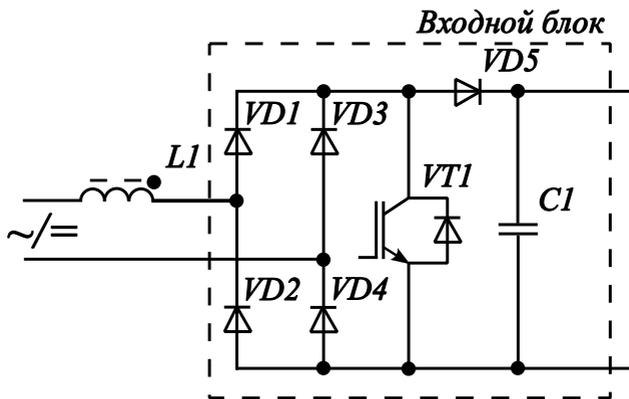


Рис. 2. Схема входного блока

Fig. 2. Scheme of the input block

В многокаскадном ВП входные блоки соединены последовательно и имеют один общий дроссель $L1$. Следует заметить, что в рассматриваемом преобразователе типа $EVB51$ напряжение контактной сети переменного тока поступает на четыре входных блока через встроенные понижающий однофазный автотрансформатор $TV1$ и дроссель $L1$. В связи с этим амплитуда суммы входных напряжений переменного тока входных блоков определяется как $U_{вхл} = U_{инн}K_{тр}$, где $U_{инн}$ – амплитуда входного напряжения контактной сети; $K_{тр}$ – коэффициент трансформации понижающего автотрансформатора $TV1$.

Входные блоки ВП могут работать в режимах синхронного и асинхронного алгоритмов управления силовыми ключами. На рис. 3 показаны режимы синхронного и асинхронного управления четырьмя входными блоками, которые имеет преобразователь $EVB51$, где u_{VT1} , u_{VT2} , u_{VT3} , u_{VT4} импульсы управления (черные прямоугольники), которые подают на затворы транзисторов $VT1-VT4$ соответствующих входных блоков; t_u – длительность включенного состояния транзистора; T – период повторности.

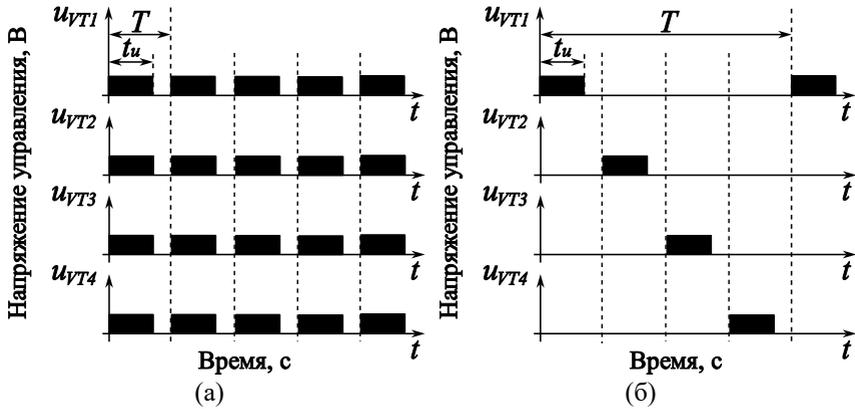


Рис. 3. Синхронное (а) и асинхронное управление

Fig. 3. Synchronous (a) and asynchronous (b) control

С учетом [1, 6, 12], для рассматриваемых входных блоков ВП при работе от контактной сети переменного тока, получено выражение для расчета коэффициента заполнения $\gamma(t)$:

$$\gamma(t) = 1 - \frac{U_{\text{вхм}} |\sin(\omega_1 t)|}{U_{\text{out s}}}, \quad (1)$$

где ω_1 – угловая частота напряжения контактной сети переменного тока; $U_{\text{out s}}$ – сумма выходных напряжений постоянного тока входных блоков.

Предложено, кривую входного переменного тока $i_{in}(t)$, которая имеет ШИМ форму благодаря переключению транзисторов входных блоков по заданному синусоидальному закону [1, 2], разделить на медленноменяющуюся $i_{in1m}(t)$ и быстроменяющуюся $i_{in\delta}(t)$ составляющие [6, 14, 15].

Медленноменяющаяся составляющая входного тока $i_{in1m}(t)$ представляет собой синусоидальную функцию с частотой первой гармоники, которая совпадает по фазе с входным напряжением контактной сети:

$$i_{in1m}(t) = \frac{2S}{U_{\text{вхм}} \eta} \sin(\omega_1 t), \quad (2)$$

где S – выходная суммарная мощность ВП; η – коэффициент полезного действия ВП.

В результате исследований установлено, что в режиме синхронного управления силовыми ключами при любом количестве входных блоков ВП

положительная и отрицательная огибающие амплитуд быстроменяющейся составляющей $i_{in\sigma}(t)$ входного тока определяется как:

$$i_{+6S} = \frac{U_{вхм} \sin(\omega_1 t)}{2f_c L_1} \left(1 - \frac{U_{вхм} \sin(\omega_1 t)}{U_{out s}} \right); \quad (3)$$

$$i_{-6S} = \frac{-U_{вхм} \sin(\omega_1 t)}{2f_c L_1} \left(1 - \frac{U_{вхм} \sin(\omega_1 t)}{U_{out s}} \right), \quad (4)$$

где f_c – частота переключения транзистора входного блока.

В режиме асинхронного управления (рис. 3б) силовыми ключами при наличии четырех входных блоков, которые имеет преобразователь *EVB51*, существуют четыре характерных участка кривых быстроизменяющейся составляющей входного тока, которые соответствуют коэффициенту заполнения γ : от 0 до 0,25; от 0,25 до 0,5; от 0,5 до 0,75; от 0,75 до 1. Для этих случаев получены следующие выражения:

$$\begin{aligned} i_{\pm 6A4} &= \frac{\pm 1}{8f_c L_1} \left(7u_{вх}(t) - \frac{4u_{вх}(t)^2}{U_{out s}} - 3U_{out s} \right); & 0 \leq \gamma < 0,25; \\ i_{\pm 6A4} &= \frac{\pm 1}{8f_c L_1} \left(5u_{вх}(t) - \frac{4u_{вх}(t)^2}{U_{out s}} - \frac{3}{2}U_{out s} \right); & 0,25 \leq \gamma < 0,5; \\ i_{\pm 6A4} &= \frac{\pm 1}{8f_c L_1} \left(3u_{вх}(t) - \frac{4u_{вх}(t)^2}{U_{out s}} - \frac{1}{2}U_{out s} \right); & 0,5 \leq \gamma < 0,75; \\ i_{\pm 6A4} &= \frac{\pm 1}{8f_c L_1} \left(u_{вх}(t) - \frac{4 \cdot u_{вх}(t)^2}{U_{out s}} \right); & 0,75 \leq \gamma < 1, \end{aligned} \quad (5)$$

где $u_{вх}(t) = U_{вхм} \cdot \sin(\omega_1 t)$ – мгновенное суммарное значение напряжения, которое поступает на входные блоки.

Как видно из (3)-(5), в режиме синхронного и асинхронного управления силовыми ключами амплитуда быстроменяющейся составляющей входного тока не зависит от выходной мощности S преобразователя.

III. Анализ влияния режимов

синхронного и асинхронного управления на качество входного тока

Из [8] следует, что нормативным показателем качества входного потребляемого тока принят коэффициент искажений тока:

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n_r=2}^{40} I_{n_r}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100, \quad (6)$$

где I_{n_r} – действующее значение n_r -гармонической составляющей тока; $I_{(1)}$ – действующее значение первой гармонической составляющей тока.

При нахождении K_I было принято, что:

- частота входного напряжения контактной сети во много раз меньше частоты коммутации силовых транзисторов ВП, т. е. $f_1 \ll f_c$;
- ВП работает в режиме непрерывного тока;
- коэффициент заполнения $\gamma(t)$ определяется из (1).
- нагрузка силовой схемы имеет активный характер благодаря последующему выпрямлению высокочастотного тока;
- отсутствуют потери мощности в полупроводниковых элементах силовой схемы;
- отсутствует насыщение в магнитной системе входного реактора $L1$;
- отсутствуют потери мощности в обмотке и в магнитной системе входного реактора $L1$;
- отсутствуют потери мощности в выходном конденсаторе $C1$.

В этом случае было сделано допущение, что:

$$\sum_{n_r=2}^{40} I_{n_r}^2 = \frac{I_6^2}{K_{тр}^2}, \quad (7)$$

где I_6 – действующее значение быстромменяющейся составляющей входного тока.

С учетом (6) и принятого допущения (7) было выведено выражение для расчета коэффициента искажений входного тока в режиме синхронного управления силовыми ключами при любом количестве входных блоков:

$$K_{I_s} = \frac{1}{f_c L_1} \sqrt{\frac{U_{in}^2}{16} - \frac{\sqrt{2} U_{in}^3}{3\pi U_{out\ s}} + \frac{3U_{in}^4}{32U_{out\ s}^2}} \cdot 100, \quad (8)$$

$$\sqrt{\left(\frac{Q}{U_{in} n}\right)^2 - \frac{1}{(f_c L_1)^2} \left(\frac{U_{in}^2}{16} - \frac{\sqrt{2} U_{in}^3}{3\pi U_{out\ s}} + \frac{3U_{in}^4}{32U_{out\ s}^2}\right)}$$

где U_{in} – действующее значение напряжения контактной сети.

Коэффициент искажения входного тока для ВП, содержащего N входных блоков с асинхронным способом управления, определен как:

$$K_{I \Lambda(n=N)} = \frac{I_{6 \Lambda(n=N)}}{\sqrt{\left(\frac{Q}{U_{in} \eta}\right)^2 - \left(I_{6 \Lambda(n=N)}\right)^2}} \cdot 100, \quad (9)$$

где $I_{6 \Lambda(n=N)} = \sum_{k=1}^N \left(\frac{U_{in} \sqrt{f_1}}{2Nf_c L_1} \sqrt{Z1_k - Z2_k + Z3_k - Z4_k + B_k^2 \left(\frac{D_k}{\omega_1} - \frac{E_k}{\omega_1} \right)} \right)$;

$$Z1_k = \frac{U_{in}^4 N^2}{U_{outs}^2} \left(\frac{3}{2} \left(\frac{D_k}{\omega_1} - \frac{E_k}{\omega_1} \right) + \frac{\sin 4D_k - \sin 4E_k}{8\omega_1} + \frac{\sin 2E_k - \sin 2D_k}{\omega_1} \right);$$

$$Z2_k = \frac{8U_{in} N A_k}{\sqrt{2}\omega_1 U_{outs}} \left(\cos E_k - \cos D_k + \frac{\cos^3 D_k - \cos^3 E_k}{3} \right);$$

$$Z3_k = U_{in}^2 (A_k^2 + 2NB_k) \left(\frac{D_k}{\omega_1} - \frac{E_k}{\omega_1} + \frac{\sin 2E_k - \sin 2D_k}{2\omega_1} \right);$$

$$Z4_k = \frac{\sqrt{2}U_{in} U_{outs} A_k B_k}{\omega_1} \cdot (\cos E_k - \cos D_k);$$

$$A_k = (2N - j_k - i_k)4; \quad B_k = \left(\frac{i_k j_k}{N} - i_k - j_k + N \right); \quad D_N = \frac{T}{4};$$

$$D_k = \arcsin \frac{\left(1 - \frac{j_k}{N}\right) U_{outs}}{\sqrt{2}U_{in}}; \quad E_1 = 0; \quad E_k = \arcsin \frac{\left(1 - \frac{i_k}{N}\right) U_{outs}}{\sqrt{2}U_{in}};$$

$$k = 1, 2, \dots, N; \quad \frac{j_k}{N} < \gamma_k \leq \frac{i_k}{N}; \quad i_k = 1, 2, \dots, N; \quad j_k = 0, 1, \dots, (N-1).$$

Были проведены исследования влияния выходной мощности ВП на коэффициент искажения входного тока при различных количествах входных блоков и различных режимах управления силовыми ключами. В качестве наглядных примеров на рис. 4а (при одном входном блоке) и рис. 4б (при четырех входных блоках) в режиме асинхронного управления представлены зависимости относительных коэффициентов искажения входного тока

$$K_{I \Lambda(n=1)}^* = \frac{K_{I \Lambda(n=1)}}{K_{\max I \Lambda(n=1)}} \quad \text{и} \quad K_{I \Lambda(n=4)}^* = \frac{K_{I \Lambda(n=4)}}{K_{\max I \Lambda(n=4)}},$$

от относительного действующего значения входного напряжения $U_{in}^* = U_{in} / U_{max\ in}$ при выходной мощности ВП, равной $S = 100$ кВА (линия 1), при $S = 75$ кВА (линия 2), при $S = 50$ кВА (линия 3) и при $S = 25$ кВА (линия 4), где $K_{max\ I\ \Delta(n=1)}$ – максимальное значение коэффициента искажения входного тока при одном входном блоке; $U_{max\ in}$ – максимальное действующее значения напряжения контактной сети переменного тока.

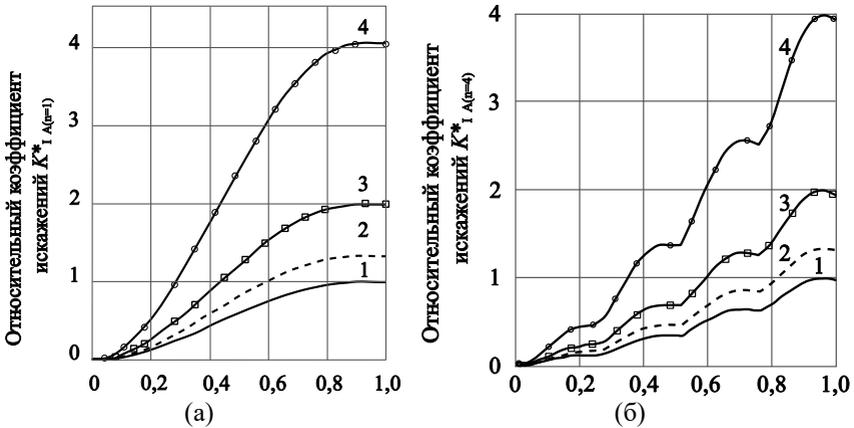


Рис. 4. Зависимость относительного коэффициента искажения входного тока ВП с одним входным блоком (а) и четырьмя входными блоками и асинхронным алгоритмом управления (б) при выходной мощности ВП: 1 – 100 кВА, 2 – 75 кВА, 3 – 50 кВА, 4 – 25 кВА

Fig. 4. Relative input current distortion coefficient of high-voltage converter with one input block (a) and four input block and asynchronous control principle (b) vs high-voltage converter output power: 1 – 100 kVA, 2 – 75 kVA, 3 – 50 kVA, 4 – 25 kVA

В результате исследований был сделан вывод, что коэффициент искажения входного тока не существенно зависит от выходной мощности ВП при любом количестве входных блоков и в любом режиме управления силовыми транзисторами. Это объясняется отсутствием зависимости действующего значения быстроменяющейся составляющей входного тока от мощности нагрузки. Отклонение от данного вывода начинает проявляться, когда действующее значение медленноменяющейся составляющей становится сопоставимо с действующим значением быстроменяющейся составляющей входного тока, что имеет место при входном напряжении менее 7 % от номинального значения.

Анализ показывает, что при одной и той же частоте коммутации силовых транзисторов с различным количеством входных блоков в асинхронном режиме управления, работающих при одной и той же мощности нагрузки, отношение коэффициента искажения входного тока к мощности нагрузки отклоняется от обратно пропорционального закона с уменьшением мощности нагрузки. Данный фактор проявляется при меньшем количестве входных блоков и более высоком действующем значении входного напряжения контактной сети.

Экспериментальная проверка на преобразователе *EVB51* при напряжении контактной сети переменного и постоянного тока подтвердила правильность полученных выражений и выводов.

IV. Заключение

В режиме синхронного и асинхронного управления силовыми ключами амплитуда пульсаций входного тока не зависит от выходной мощности S преобразователя.

Коэффициент искажений входного тока в режиме синхронного управления силовыми ключами не зависит от количества входных блоков.

В асинхронном режиме управления силовыми ключами применение двух входных блоков в ВП позволяет добиться максимум 4,5-кратного и минимум 2-кратного улучшения коэффициента искажения тока, а применение четырех входных блоков – максимум 14-кратного и минимум 4,2-кратного улучшения коэффициента искажений входного тока по сравнению с одним входным блоком в ВП.

Коэффициент искажения входного тока несущественно зависит от выходной мощности ВП при любом количестве входных блоков и в любом режиме управления силовыми транзисторами.

Полученные результаты можно использовать при проектировании высоковольтных многокаскадных преобразователей с входным напряжением как переменного, так и постоянного тока.

© Скороход Ю.Ю., 2025

Поступила в редакцию 02.12.2024

Принята к публикации 30.01.2025

Received 02.12.2024

Accepted 30.01.2025

Библиографический список

- [1] Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
- [2] Makarov S.N., Ludwig R., Bitar S.J. Practical Electrical Engineering. Springer Cham, 2016. – 987 p. DOI: 10.1007/978-3-319-21173-2

- [3] Скороход Ю.Ю., Вольский С.И. Анализ бортовых высоковольтных преобразователей однофазного переменного тока с повышенным коэффициентом мощности // *Электричество*. 2020. № 10. С. 44-51. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-10-44-51
- [4] Sepehr A., Saradarzadeh M., Farhangi S. High-voltage isolated multioutput power supply for multilevel converters // *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2017. № 25 (4). С. 3319-3333. DOI: 10.3906/elk-1604-410
- [5] Резников С.Б., Вольский С.И., Вышков Ю.Д., Кириллов В.Ю., Харченко И.А. Силовые полупроводниковые ключи для импульсных преобразователей электроэнергии с модульно-масштабируемой архитектурой // *Электротехника*. 2019. № 2. С. 10-17.
- [6] Зиновьев Г.С. Силовая электроника. М.: Юрайт, 2017. – 667 с.
- [7] ГОСТ 33436.3-1-2015. Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть 3-1. Железнодорожный подвижной состав. Требования и методы испытаний. Введ. 2017-06-01. М.: Стандартинформ, 2015. – 26 с.
- [8] ГОСТ Р 55434-2013. Электропоезда. Общие технические требования. Введ. 2014-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 61 с.
- [9] Skorokhod Y., Philin D., Volskiy S. Analysis of high-voltage converters with serial connection units and with input current correction // 2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Oct. 19-21, 2020, Prague, Czech Republic: IEEE, 2020. P. 1-5. DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269238
- [10] UIC CODE 550-3. Power supply installations for passenger stock. Effect electrical installations outside passenger coaches. Введ. 2005-04-01. Paris: UIC, 2005. – 12 p.
- [11] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
- [12] IEC 62236-3-1. Railway applications. Electromagnetic compatibility. Part 3-1: Rolling stock. Train and complete vehicle. Введ. 2008-02-01. IEC, 2008. – 63 p.
- [13] ГОСТ 6962-75. Транспорт, электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений. Введ. 1977-01-01. М.: Издательство стандартов, 1976. – 8 с.
- [14] Skorokhod Y., Volskiy S. The analysis and simulation of power circuits for AC high-voltage converter // 2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Nov. 27-30, 2007, Bangkok, Thailand: IEEE, 2007. P. 1741-1747. DOI: 10.1109/PEDS.2007.4487944
- [15] Bacha S., Munteanu I., Bratcu A.I. Power electronic converters modeling and control. London: Springer, 2014. – 454 p.

References

- [1] V.I. Meleshin, *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika [Transistor conversion systems]*. Moscow: Tekhnosfera, 2005 (in Russian).
- [2] S.N. Makarov, R. Ludwig and S.J. Bitar, *Practical Electrical Engineering*, 1st ed. Springer Cham, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-21173-2

- [3] Y.Y. Skorokhod and S.I. Volskiy, "An analysis of on-board high-voltage converters of single-phase alternating current with increased microelectric power factor", *Elektrichestvo*, no. 10, pp. 44-51, 2020. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-10-44-51
- [4] A. Sepehr, M. Saradarzadeh and S. Farhangi, "High-voltage isolated multioutput power supply for multilevel converters", *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 25, no. 4, pp. 3319-3333, Jan. 2017. DOI: 10.3906/elk-1604-410
- [5] S.B. Reznikov, S.I. Vol'skii, Y.D. Vyshkov, V.Y. Kirillov and I.A. Kharchenko, "Power semiconductor switches for pulse power transformers with a modular and scalable architecture", *Russian Electrical Engineering*, vol. 90, no. 2, pp. 100-106, 2019.
- [6] G.S. Zinoviev, *Silovaya elektronika [Power Electronic]*. Moscow: Urait, 2017 (in Russian).
- [7] Electromagnetic compatibility of technical equipment. Railway systems and equipment. Part 3-1. Railway rolling stock. Requirements and test methods, GOST 33436.3-1-2015, June 2017.
- [8] Electric trains. General technical requirements, GOST R 55434-2013, Jan. 2014.
- [9] Y. Skorokhod, D. Philin and S. Volskiy, "Analysis of high-voltage converters with serial connection units and with input current correction", in proc. *2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Oct. 19-21, 2020, Prague, Czech Republic, pp. 1-5. DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269238
- [10] Power supply installations for passenger stock. Effect electrical installations outside passenger coaches, UIC CODE 550-3, Apr. 2005.
- [11] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems, GOST 32144-2013, July 2014.
- [12] Railway applications. Electromagnetic compatibility. Part 3-1: Rolling stock. Train and complete vehicle, IEC 62236-3-1, Feb. 2008.
- [13] Electrified transport with overhead system power supply. Voltage row, GOST 6962-75, January 1977.
- [14] Y. Skorokhod and S. Volskiy, "The analysis and simulation of power circuits for AC high-voltage converter", in proc. *2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Nov. 27-30, 2007, Bangkok, Thailand, pp. 1741-1747. DOI: 10.1109/PEDS.2007.4487944
- [15] S. Bacha, I. Munteanu and A.I. Bratcu, *Power electronic converters modeling and control*. London: Springer, 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Скоруход Юрий Юрьевич, начальник конструкторского бюро ООО «Трансконвертер», г. Москва, Российская Федерация. **Yury Y. Skorokhod**, head of design office of the Transconverter LLC, Moscow, Russian Federation.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК [621.311.236+629.5]:371.693.4

EDN FOTLBI

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ТРЕНАЖЕР ОТРАБОТКИ ПРАКТИЧЕСКИХ НАВЫКОВ ОПЕРАТОРОВ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОЙ СИМУЛЯЦИИ

А.О. РогожниковORCID: 0009-0002-8354-3766 e-mail: aleksei17_90@mail.ruКамчатский государственный технический университет
*Петропавловск-Камчатский, Россия***О.А. Белов**ORCID: 0000-0002-7382-9034 e-mail: boa-1@mail.ruКамчатский государственный технический университет
Петропавловск-Камчатский, Россия

Судовая электроэнергетическая система играет ключевую роль в работе других судовых систем, устройств и отдельных механизмов. Ее основная задача заключается в обеспечении непрерывной подачи высококачественной электроэнергии для нужд судна. Работа судовой электростанции не только влияет на качество эксплуатации, но и напрямую связана с надежностью и общей безопасностью судна. Рассматривается опытный образец тренажера судовой электростанции, предназначенный для практической подготовки и приобретения навыков контроля и управления судовыми электростанциями. Реализована конструкция элементов тренажера: блока управления и индикации, электрической нагрузки, блока модели дизель-генератора, состоящего из асинхронного двигателя и трехфазного синхронного генератора. Элементы конструкции тренажера произведены по технологии 3D-печати. Определены задачи для совершенствования опытной конструкции и дальнейшей доработки тренажера.

Ключевые слова: судовая электроэнергетическая система, судовая электростанция, электрическая энергия, автоматизация, тренажерная подготовка.

Для цитирования: Рогожников А.О., Белов О.А. Универсальный тренажер отработки практических навыков операторов судовой электростанции с использованием программной симуляции // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 1. С. 93-104. EDN FOTLBI

UNIVERSAL SIMULATOR FOR TRAINING PRACTICAL SKILLS OF MARINE POWER STATION OPERATORS USING SOFTWARE SIMULATION

A.O. Rogozhnikov

ORCID: 0009-0002-8354-3766 e-mail: aleksei17_90@mail.ru

Kamchatka State Technical University
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

O.A. Belov

ORCID: 0000-0002-7382-9034 e-mail: boa-1@mail.ru

Kamchatka State Technical University
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract. The ship's electric power system plays a key role in the operation of other ship systems, devices and individual mechanisms. The main task of the electric power system is to provide a continuous supply of high-quality electricity for the needs of the vessel. The operation of the ship's power plant affects not only the quality of operation, but is also directly related to the reliability and overall safety of the vessel. A prototype of a ship's power plant simulator is considered, designed for practical training and acquisition of skills in monitoring and managing ship's power plants. The design of the simulator elements has been implemented: a control and indication unit, electrical load, a diesel generator model unit consisting of an asynchronous motor and a three-phase synchronous generator. The design elements of the simulator are manufactured using 3D printing technology. Tasks for improving the prototype design and for further refinement of the simulator have been defined.

Key words: ship electric power system, ship power plant, electric energy, automation, short circuit, simulator training.

For citation: A.O. Rogozhnikov and O.A. Belov, "Universal simulator for practicing practical skills of ship power plant operators using software simulation", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 93-104, 2025. EDN FOTLBI

I. Введение

Подготовка операторов судовой электростанции является важной задачей [1-3]. Разработка методов их практической подготовки ведется в различных странах мира [4, 5]. Эффективным решением является интеграция в учебный процесс подготовки электромехаников специальных тренажеров [6-8]. Их использование направлено на освоение аварийных режимов эксплуатации судовой электростанции и формирование у обучаемых понимания физических процессов, происходящих во время ее работы. Задачей дан-

ного исследования является разработка опытного образца тренажера судовой электростанции.

Анализ структуры и функциональности основных прототипов разрабатываемого тренажера показал, что, несмотря на однотипную структурную схему и близкий элементный состав, у рассматриваемых тренажеров имеются существенные отличия. Так тренажер, производимый компанией «ДВК-электро» [9], позволяет моделировать номинальные режимы работы судовой электростанции. Тренажер компании «Галсен» [10] также предназначен для моделирования работы судовой электростанции в номинальных режимах работы. Тренажеры «ДВК-электро» и «Галсен» состоят из дизель-генераторных (ДГ) агрегатов, имитируемых асинхронным электродвигателем, выступающим в качестве дизельного двигателя и синхронного генератора. Управление нагрузкой на тренажерах возможно как в ручном (тумблерами и контакторами), так и в автоматическом режиме с помощью контроллеров управления генераторным агрегатом. Тренажеры в составе имеют главный распределительный щит с панелями синхронизации, приборы индикации, автоматический регулятор, который действует по изменению как генерируемого напряжения, так и по току.

На основании анализа функционала тренажеров выявлен основной недостаток: невозможность отработки режимов, связанных с коротким замыканием цепи нагрузки и перегрузки генератора.

Основная задача, которая решалась при разработке универсального тренажера связана с расширением функциональных возможностей тренажера для подготовки операторов различных видов автономных электростанций. В табл. 1 приведены общие сравнительные характеристики рассматриваемых тренажеров, которые применяются для подготовки операторов автономных электростанций.

Таблица 1.
Сравнение характеристик тренажеров электростанции

Table 1.
Comparison of power plant simulator characteristics

| Критерий сравнения | Тренажер «Галсен» | Тренажер «ДВК электро» | Предлагаемый тренажер |
|---|--|--|----------------------------------|
| Возможность моделирования аварийных режимов работы электростанции | Частичная возможность до срабатывания защиты | Частичная возможность до срабатывания защиты | Обеспечивается микроконтроллером |

Продолжение табл. 1

Table 1 (continued)

| | | | |
|---|---|---|---|
| Возможность фиксации действий обучающегося | Нет устройства вывода отчета | Нет устройства вывода отчета | Обеспечивается микроконтроллером и термопринтером |
| Возможность симуляции высокооборотистого двигателя | Отсутствует данный модуль | Отсутствует данный модуль | Обеспечивается дополнительным модулем |
| Возможность изменения параметров симулируемой электростанции | Отсутствует возможность | Отсутствует возможность | Обеспечивается микроконтроллером |
| Возможность управления приборами индикации микроконтроллером | Отсутствует возможность | Отсутствует возможность | Приборы индикации управляются микроконтроллером |
| Возможность моделирования неисправности оборудования электростанции | Отсутствует возможность из-за автоматической защиты | Обеспечивается индикаторами (срабатывает сигнал аварии на панели) | Обеспечивается микроконтроллером (изменяются параметры работы оборудования) |

Целью разработки данного тренажера является увеличение набора технических средств для специализированных задач. Данная цель подразумевает создание стенда, способного моделировать работу судовой электростанции с расширенными функциональными возможностями.

II. Опытный образец тренажера судовой электростанции

Структурная схема для моделирования судовой электростанции показана на рис. 1. Она включает приводной асинхронный двигатель (*C.E.SET. CIM 2/55-132/AD4*), частотный преобразователь ПЧВ1-1К5-А, трехфазный синхронный генератор (*Transmotor GE-12-400VAC 0-30V VDC*), соединенный с электрической нагрузкой и регулятором напряжения. В частности, используется микроконтроллер ДГ, который измеряет основные электрические показатели системы с помощью датчиков тока и напряжения. Также микроконтроллер ДГ управляет приводным двигателем и возбуждением генератора на основании данных, поступающих с микроконтроллера управления и индикации. Приборы индикации управляются микроконтроллером управления и индикации по данным, поступающих с блока управления и датчиков.

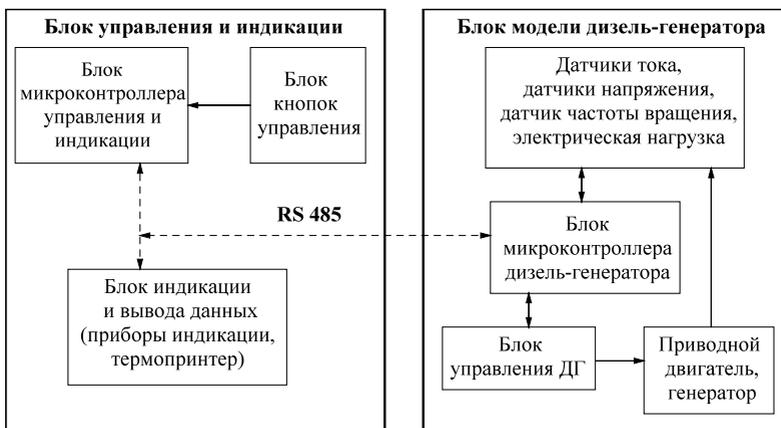


Рис. 1. Структурная схема предлагаемого тренажера

Fig. 1. Block diagram of the proposed simulator

В зависимости от цели проводимой работы выбирается режим работы тренажера: нормальный режим или симуляция аварийных режимов работы.

В нормальном режиме тренажер работает как физическая модель. С блока управления вводятся параметры электростанции соответствующие нормальному режиму работы, а физическая модель ДГ имитирует работу электростанции. Датчики используются для сбора основных параметров работы электростанции и исключают переход в аварийный режим работы электростанции.

Функциональные возможности тренажера расширяются за счет реализации аварийных режимов, таких как короткое замыкание, длительная перегрузка, повышенное напряжение сети, превышение частоты генератора. Переход тренажера в режим симуляции происходит по превышению нормальных параметров электростанции или при выборе инструктором тренажера данной настройки. В режиме симуляции микроконтроллеры позволяют изменять характеристики электростанции (мощность напряжение, частота) и управляют показаниями приборов индикации.

Общий вид предлагаемого тренажера показан на рис. 2. Массогабаритные характеристики предлагаемого тренажера: 1200x1000x300 мм, масса тренажера не более 50 кг.

Далее описано проектирование и изготовление основных блоков тренажера.

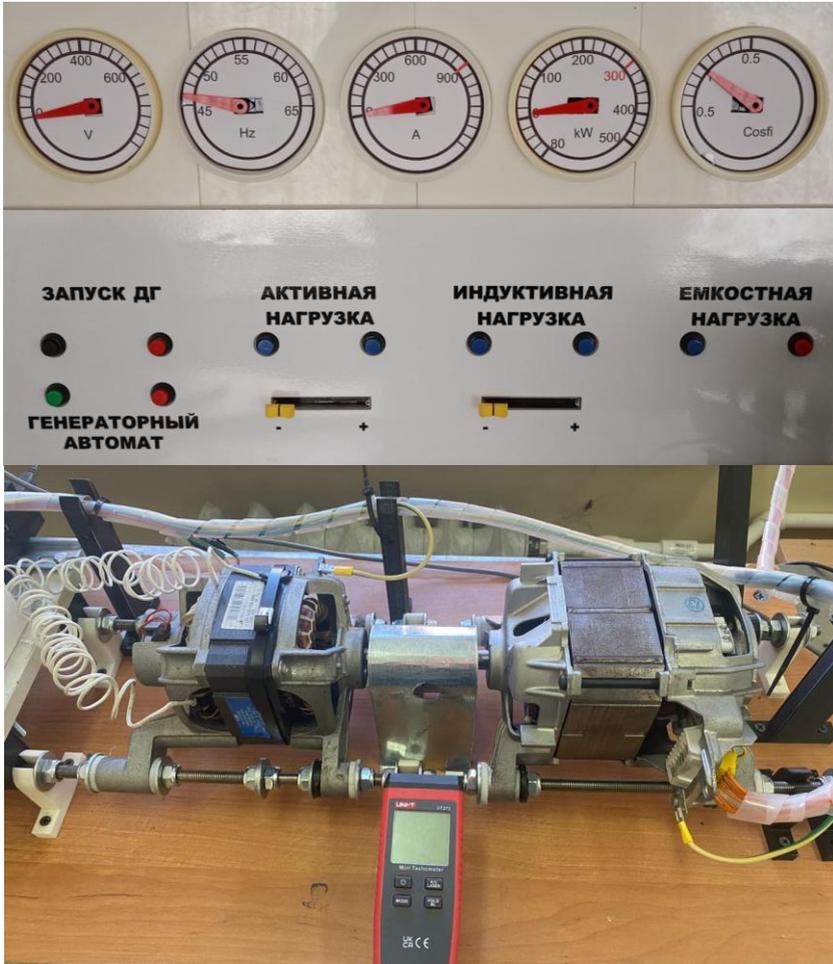


Рис. 2. Общий вид предлагаемого тренажера:
сверху – модуль индикации и управления тренажера; снизу – блок модели ДГ

Fig. 2. General view of the proposed simulator:
the upper part – the indication and control unit of the simulator;
the lower part – the diesel generator model

Корпус модуля индикации и управления тренажера, представленный на рис. 2 сверху, изготовлен по технологии 3D-печати на принтере *Picaso-3D Designer X* из ABS пластика. Область печати принтера *Picaso-3D*

Designer X 200x200x210 мм. Печать корпусов блоков управления и индикации осуществлялась из частей с последующим соединением. ABS пластик хорошо поддается растворению в ацетоне с целью сглаживания неровностей при печати и прочно склеивается ацетон содержащими клеями. Корпус модуля индикации и управления состоит из четырех частей, соединенных между собой пазами и паз дополнительно проклеен.

Лицевая часть панели управления изготовлена на станке лазерной резки по чертежам в масштабе 1:1 из PETG пластика с гравировкой надписей указывающих вид электрической нагрузки и обозначения кнопок. На лицевой панели в отверстия, вырезанные на станке лазерной резки, монтируются:

- кнопки запуска/отключения ДГ;
- кнопки включения/отключения генераторного автомата;
- кнопки включения/отключения активной, индуктивной, емкостной нагрузок;
- органы управления величиной нагрузки – ползунковые потенциометры.

Такой способ изготовления позволяет снизить стоимость изготовления за счет автоматизации производства, а также повышает износостойкость готовой детали.

Лицевая часть панели индикации и корпуса приборов индикации также изготовлена на 3D принтере. Замена аналоговых стрелочных приборов цифровыми управляемыми микроконтроллером позволила расширить перечень моделируемых электростанций путем изменения шкал на приборах и настройкой алгоритмов работы модели под различные проекты судов и мощности энергоустановок при необходимости обучения специалистов электромехаников. Кнопки управления изменяют величину тока возбуждения генератора, частоту оборотов приводного двигателя, включают/отключают генераторный автомат. Ползунковые потенциометры изменяют величину электрической нагрузки генератора, синхронизированного с шинами электростанции тренажера. Левый потенциометр регулирует активную нагрузку, правый индуктивную. В нормальном режиме работы подключаются лампы и катушки индуктивности ступенчато с помощью реле нагрузки. В режиме перегрузки по току генератора потенциометр влияет на данные, поступающие в модель, что изменяет показания приборов и поведение ДГ.

Элементы виброгашения электродвигателей, составляющих модель ДГ, были изготовлены методом литья силикона твердостью 20 по Шору в форму, напечатанную на 3D-принтере. 3D модель формы (слева) и готовый образец элементов виброгашения (справа) показаны на рис. 3.

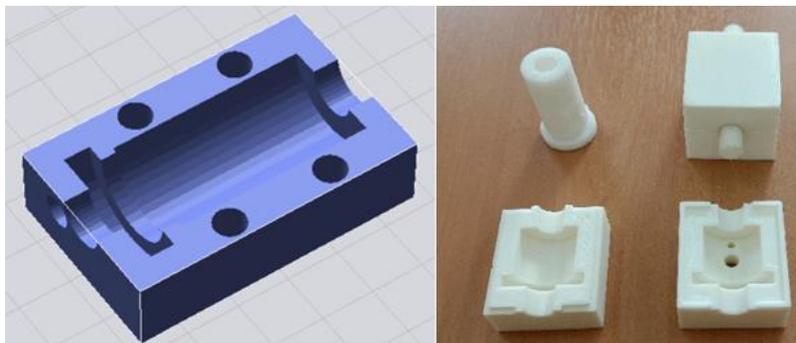


Рис. 3. Элементы виброгашения электродвигателей

Fig. 3. Vibration damping elements of electric motors

Такой метод изготовления деталей повышает скорость изготовления и повторяемость конечного изделия, что положительно влияет на стоимость готового тренажера судовой электростанции.

Готовый блок модели ДГ показан на рис. 2 снизу и состоит из асинхронного приводного двигателя мощностью 600 Вт, напряжением питания 400 В и генератора мощностью 400 Вт, соединенных между собой с помощью гибкой муфты. Двигатель и генератор закреплены к основанию модуля на металлических резьбовых шпильках с опорой на пластиковые детали, изготовленные на 3D принтере.

Для управления блоком индикации выбрана плата микроконтроллера *Arduino Mega pro 2560 rev 3*, поскольку стандартная версия микроконтроллера *Arduino Mega 2560 rev 3* имеет недостатки:

- увеличенные габариты (110x53 мм) по сравнению с про-версией контроллера (54x38 мм);
- контакты выполнены на распаянных штыревых колодках и не отличаются надежностью по сравнению с контактами, подготовленными под пайку на используемой плате микроконтроллера;
- неудобное расположение контактов стандартной версии платы микроконтроллера (в используемой версии платы контакты расположены по краям в два ряда, что более удобно).

При этом плата микроконтроллера *Arduino Mega pro 2560 rev 3* оснащена 54 цифровыми выходами, 16 аналоговыми портами, 4 портами UART, что позволяет производить подключение всех периферийных устройств, используемых в разработанном тренажере. Программа для платы написана на языке C++. Программирование блока управления и индикации проводится в среде *Arduino ide*, которая обеспечивает подключение библиотек и возможность отладки программного кода [11, 12].

Алгоритм работы программы включает следующие основные операции:

- инициализация всех переменных, датчиков и периферии тренажера;
- опрос датчиков и преобразование сигнала аналого-цифровым преобразователем платы;
- проверка данных, поступающих с датчиков на превышение основных параметров электростанции (в случае превышения основных параметров электростанции происходит переход в режим симуляции, либо аварийное отключение электростанции в зависимости от выбора программы инструктором тренажера);
- обработка и адаптация данных с датчиков под сервоприводы стрелочных приборов индикации;
- опрос кнопок панели управления;
- изменение переменных и формирование сигнала для реле нагрузок, сигнала для частотного преобразователя и блока возбуждения генератора.

III. Заключение

Высокий уровень профессиональной подготовки персонала играет важнейшую роль в качественной эксплуатации и обеспечении надежности систем. Применение современных цифровых технологий в образовательном процессе снижает уровень аварийности на действующих электростанциях [13, 14].

Эффективность разработки достигается за счет того, что предлагаемый стенд для симуляции работы судовой электростанции оснащен микроконтроллером, который позволяет моделировать аварийные режимы работы, например, перегрузки генератора или короткого замыкания. В дальнейшем предполагается доработка модели тренажера за счет внедрения датчиков температуры обмоток и колец генератора, что позволит более полно воспроизвести модель электростанции.

© Рогожников А.О., 2025

© Белов О.А., 2025

Поступила в редакцию 09.12.2024

Принята к публикации 13.01.2025

Received 09.12.2024

Accepted 13.01.2025

Библиографический список

- [1] Белов О.А., Белова Е.П. Инженерное образование как фактор развития техники и технологий // Десятая нац. (всерос.) науч.-практ. конф. «Наука, образование, инновации: пути развития», Май 21-23, 2019, Петропавловск-Камчатский, Россия. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2019. С. 106-108.

- [2] Белов О.А., Толстова Л.А. Моделирование процесса обучения курсантов для формирования навыков технической эксплуатации // Вестник Государственного Морского Университета имени Адмирала Ф.Ф. Ушакова. 2016. № 3 (16). С. 78-81.
- [3] International convention on standards of training, certification and watchkeeping for seafarers. London: IMO, 2013. – 413 p.
- [4] Mullajonov B.A., Mamirov N.H. Modern technologies in automation systems // Современные Научные Исследования и Инновации. 2020. № 5 (109). [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/05/92668> (дата обращения 15.12.2024).
- [5] Ibrahim D. ARM-based microcontroller multitasking projects: Using the FreeRTOS multitasking kernel. Newnes, 2020. – 524 p. DOI: 10.1016/C2019-0-03224-4
- [6] Поляков Б.Н. Перспективы применения микропроцессорных систем программного управления приводами энергоемкого оборудования сложных объектов машиностроения и металлургии // Современные Научные Исследования и Инновации. 2020. № 11. [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/en/issues/2020/11/93946> (дата обращения 15.12.2024).
- [7] Fa-Qun Q., Xue-Dong J., Shi-qing Z. Design of stepping motor control system based on AT89C51 microcontroller // Procedia Engineering. 2011. Vol. 15. P. 2276-2280. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.426
- [8] Guerrero J.M., Jin Z., Liu W., Othman M., Savaghebi M., Anvari-Moghaddam A., Meng L., Vasquez J.C. Shipboard microgrids: Maritime islanded power systems technologies // PCIM ASIA 2016, June 28 – Aug. 30, 2016, Shanghai, China. VDE Verlag GMBH, 2016. P. 135-142.
- [9] Тренажеры электростанций серии DGS // ООО «Компания ДВК-электро». [Электронный ресурс]. URL: <https://dvk-electro.ru/simulators.html> (дата обращения 22.10.2024).
- [10] Тренажер-модель судовой электрической станции (с валогенератором, с двумя вспомогательными и аварийным дизель-генераторами) // ООО «ИПЦ «Учебная техника». [Электронный ресурс]. URL: <https://galsen.ru/catalog/elektrooborudovanie-avtomatika-vodnyh-sudov/trenazher-sudovoi-elektrostantsii2> (дата обращения 22.10.2024).
- [11] Chin R. Arduino and Raspberry Pi sensor projects for the evil genius. McGraw-Hill Education TAB, 2017. – 237 p.
- [12] Cicolani J. Beginning robotics with Raspberry Pi and Arduino. Apress Inc., 2018. – 363 p.
- [13] Титов В.Г., Степанов С.Е., Васенин А.Б. Пути повышения надежности систем электроснабжения с использованием цифровых терминалов релейной защиты и автоматики // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2020. № 5. С. 3-12.
- [14] Дарьенков А.Б., Ходькина И.В., Храмов А.Е., Еретин Д.С. Интегрирование средств дополненной реальности в практикум по дисциплине «Электрические и электронные аппараты» // XXVI Межд. науч.-метод. конф. «Инновационные технологии в образовательной деятельности», Февраль 07, 2024, Нижний Новгород, Россия. Н. Новгород: НГТУ, 2024. С. 37-39.

References

- [1] O.A. Belov and E.P. Belova, "Engineering education as a factor of engineering and technologies development", in proc. *Tenth Nat. (All-Russian) scient. and pract. Conf. "Nauka, Obrazovanie, Innovacii: Puti Razvitiya [Science, Education, Innovation: Development Paths]*", May 21-23, 2019, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, pp. 106-108 (in Russian).
- [2] O.A. Belov and L.A. Tolstova, "The modeling of the process of students' training for formation of skills of technical maintenance", *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F.F. Ushakova [Bulletin of the Admiral F.F. Ushakov State Maritime University]*, vol. 3, no. 16, pp. 78-81, 2016 (in Russian).
- [3] *International convention on standards of training, certification and watchkeeping for seafarers*. London: IMO, 2013.
- [4] B.A. Mullajonov and H.H. Mamirov, "Modern technologies in automation systems", *Modern Scientific Researches and Innovations*, vol. 5 (109), May 2020. [Online]. Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2020/05/92668>
- [5] D. Ibrahim, *ARM-based microcontroller multitasking projects: Using the FreeRTOS multitasking kernel*. Newnes, 2020. DOI: 10.1016/C2019-0-03224-4
- [6] B.N. Poliakov, "Prospects for the use of microprocessor-based software control systems for drives of energy-intensive equipment of complex objects of mechanical engineering and metallurgy", *Modern Scientific Researches and Innovations*, vol. 11, Nov. 2020. [Online]. Available at: <https://web.snauka.ru/en/issues/2020/11/93946>
- [7] Q. Fa-Qun, J. Xue-Dong and Z. Shi-qing, "Design of stepping motor control system based on AT89C51 microcontroller", *Procedia Engineering*, vol. 15, pp. 2276-2280, 2011. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.426
- [8] J.M. Guerrero, Z. Jin, W. Liu, M. Othman, M. Savaghebi, A. Anvari-Moghaddam, L. Meng and J.C. Vasquez, "Shipboard microgrids: Maritime islanded power systems technologies", in proc. *PCIM ASIA 2016*, June 28 – Aug. 30, 2016, Shanghai, China, pp. 135-142.
- [9] Trenazhery elektrostancij serii DGS [Simulators of power plants of the DGS series]. [Online]. Available at: <https://dvk-electro.ru/simulators.html> [Accessed: Oct. 22, 2024] (in Russian).
- [10] Trenazher-model' sudovoj elektricheskoy stancii (s valogeneratorom, s dvumya vspomogatel'nymi i avarijnym dizel'-generatorami) [Simulator-model of a ship's electrical power station (with a shaft generator, with two auxiliary and emergency diesel generators)]. [Online]. Available at: <https://galsen.ru/catalog/elektrooborudovanie-avtomatika-vodnyh-sudov/trenazher-sudovoi-elektrostancii2> [Accessed: Oct. 22, 2024] (in Russian).
- [11] R. Chin, *Arduino and Raspberry Pi sensor projects for the evil genius*. McGraw-Hill Education TAB, 2017.
- [12] J. Cicolani, *Beginning robotics with Raspberry Pi and Arduino*. Apress Inc., 2018.
- [13] V.G. Titov, S.E. Stepanov and A.B. Vasenin, "Ways to improve the reliability of power supply systems using digital terminals relay protection and automation", *Elektrooborudovanie: Eksploatatsiya i Remont [Electrical equipment: Operation and Repair]*, no 5, pp. 3-12, 2020 (in Russian).
- [14] A.B. Dar'enkov, I.V. Khodykina, A.E. Khramov and D.S. Eretin, "Integrirovaniye sredstv dopolnenoj real'nosti v praktikum po discipline "Elektricheskie i elektronnyye"

apparaty” [Integration of augmented reality tools into the practical training on the discipline “Electrical and electronic devices”], in proc. *XXVI Int. scientific-method. Conf. “Innovacionnye tekhnologii v obrazovatel’noj deyatel’nosti [Innovative technologies in educational activities]”*, Feb. 07, 2024, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 37-39 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Рогожников Алексей Олегович, Alexey O. Rogozhnikov, senior lecturer of the Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation.

Белов Олег Александрович, Oleg A. Belov, head of department of the Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation.

УДК 621.3:537.8

EDN DEENJP

**ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ВЕКТОРА ПОЙНТИНГА
ЧЕРЕЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.
ЧАСТЬ 3. ВИХРЕВАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ
ВЕКТОРА ПОЙНТИНГА**

Е.Н. Меньшов

ORCID: 0000-0003-2668-9603 e-mail: raynd2@rambler.ru

Ульяновский государственный технический университет

Ульяновск, Россия

Вихревая составляющая вектора Пойнтинга волновой электромагнитной структуры является источником момента импульса, тогда как связанная с законом сохранения электромагнитной энергии потенциальная составляющая вектора Пойнтинга не создает момента импульса. Разработана математическая модель волновой электромагнитной структуры, описывающая энергетические характеристики и дискретные моменты импульса.

Ключевые слова: вектор Пойнтинга, вихревая и потенциальная составляющие, квант энергии, момент импульса, электромагнитная волна.

Для цитирования: Меньшов Е.Н. Представление вектора Пойнтинга через электрические характеристики электротехнических систем. Часть 3. Вихревая составляющая вектора Пойнтинга // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 1. С. 105-119. EDN DEENJP

**REPRESENTATION OF THE POYNTING VECTOR
VIA ELECTRICAL CHARACTERISTICS
OF ELECTRICAL SYSTEMS.
PART 3. THE VORTEX COMPONENT
OF THE POYNTING VECTOR**

E.N. Menshov

ORCID: 0000-0003-2668-9603 e-mail: raynd2@rambler.ru

Ulyanovsk State Technical University

Ulyanovsk, Russia

Abstract. The vortex component of the Poynting vector of the wave electromagnetic structure is the source of the angular momentum, whereas the potential component of the Poynting vector associated with the law of conservation of electromagnetic energy

does not create a moment of momentum. A mathematical model of the wave electromagnetic structure describing the energy characteristics and quantized moments of momentum has been developed.

Keywords: electromagnetic wave, energy quantum, moment of momentum, Poynting vector, vortex component and potential component.

For citation: E.N. Menshov, “Representation of the Poynting vector via electrical characteristics of electrical systems. Part 3. The vortex component of the Poynting vector”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 105-119, 2025. EDN DEENJP

I. Введение

В классической электродинамике момент импульса электромагнитного поля описывается интегралом по объему V :

$$\vec{L} = \int_V \vec{l} dV, \quad (1)$$

от объемной плотности момента импульса $\vec{l} = c^{-2} [\vec{r} \times (\vec{E} \times \vec{H})]$, где вектор Пойнтинга $\vec{\Pi} = (\vec{E} \times \vec{H})$ характеризует плотность потока электромагнитной мощности через нормальную поверхность.

Существуют различные способы описания моментов количества движения волновых структур электромагнитных процессов (ЭМП). В [1] для светового луча момент импульса, полученный в рамках параксиального приближения уравнения движения, представляется в виде двух составляющих – спинового момента импульса, обусловленного круговой поляризацией света, и орбитального момента импульса, обусловленного пространственным распределением амплитуды света. В [2] для произвольного волнового электромагнитного сгустка на основе тензорного представления векторного произведения компонентов поля описывается момент импульса в виде суммы спинового и орбитального пространственных интегралов. В качестве критерия спинового интеграла выступает отсутствие в интеграле координатного вектора, создающего трансляционные изменения подынтегральной функции. В работе показано, что плоская электромагнитная волна с произвольной поляризацией не имеет углового момента импульса.

Современные математические модели угловых моментов импульса волновых полевых структур базируются на четырехмерном тензорном анализе. Так, в [3-4] на основе корректного анализа при помощи фундаментальных законов сохранения локальных полевых характеристик подтвердилось положение, что разбиение момента импульса светового луча на спиновый и

орбитальный вклад имеет физический смысл. В [5] продолжены исследования проблемы разбиения полного момента импульса на уровне интегральных характеристик. При этом математические модели угловых моментов световых электромагнитных структур выражались через первичные характеристики поля и их потенциалы. В работах не рассматривалась возможность представления вектора Пойнтинга в виде суммы составляющих – вихревой и потенциальной.

О. Хэвисайд сделал замечание о неполноте участия вектора Пойнтинга в законе сохранения энергии: «Если у вектора есть вихревая часть, она не дает вклад в закон сохранения энергии, потому что дивергенция вихревой части равна нулю. Поэтому физический смысл потока энергии имеет вектор Пойнтинга за вычетом его вихревой части» [6].

Это утверждение основано на теореме разложения Гельмгольца [7]. Дифференцируемое векторное поле можно представить суммой двух компонент – потенциальной $\vec{\Pi}_\eta$ и вихревой $\vec{\Pi}_C$:

$$\vec{\Pi} = \vec{\Pi}_\eta + \vec{\Pi}_C. \quad (2)$$

В данной работе в рамках классической теории ЭМП исследуется связь потенциальной и вихревой составляющих вектора Пойнтинга с моментами импульса волновых электромагнитных полевых структур.

II. Физический смысл вихревой составляющей вектора Пойнтинга

Пусть полевые характеристики волновой электромагнитной структуры, ограниченные радиальным размером $r_{\text{гр}}$, удовлетворяют решению однородного волнового уравнения и описываются функцией с разделенными переменными. В этом случае пределы интегрирования по каждой независимой переменной становятся независимыми друг от друга, и $\vec{\Pi} = 0$ при $r \geq r_{\text{гр}}$, где $0 \leq r_{\text{гр}} \leq \infty$.

На основе теоремы разложения Гельмгольца (2) выражаем каждую составляющую $\vec{\Pi}$ через соответствующие потенциальные характеристики:

$$\vec{\Pi}_C = \text{rot } \vec{C}; \quad \text{div } \vec{\Pi}_C = 0 \quad \text{и} \quad \vec{\Pi}_\eta = -\text{grad } \eta; \quad \text{rot } \vec{\Pi}_\eta = 0.$$

Здесь \vec{C} и η – векторная и скалярная потенциальные функции вектора Пойнтинга соответственно. Принимается условие $\nabla \vec{C} = 0$, поэтому вектор \vec{C} выражается интегралом от ротора вектора $\vec{\Pi}$ [7]:

$$\vec{C}(r) = \frac{1}{4\pi} \left[\int_{V'} \frac{\vec{e}_x \operatorname{rot}_x \vec{\Pi}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV' + \int_{V'} \frac{\vec{e}_y \operatorname{rot}_y \vec{\Pi}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV' + \int_{V'} \frac{\vec{e}_z \operatorname{rot}_z \vec{\Pi}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV' \right];$$

$$|\vec{r} - \vec{r}'| = \sqrt{D - F \cos(\varphi - \varphi')}; \quad D = r^2 + r'^2 - 2rr' \cos \theta \cos \theta';$$

$$F = 2rr' \sin \theta \sin \theta'.$$
(3)

Вычисленный в приложении момент импульса примет вид:

$$\vec{L}_c = \frac{1}{c^2} \int_V (\vec{r} \times \operatorname{rot} \vec{C}) dV = \frac{1}{c^2} \int_V r (\nabla C_r - \frac{\partial \vec{C}}{\partial r}) dV = \frac{2}{c^2} \int_V \vec{C} dV,$$
(4)

Сопоставляя (1) и (4), получим формулу:

$$\vec{l}_c = \frac{1}{c^2} (\vec{r} \times \vec{\Pi}_c) = \frac{1}{c^2} (\vec{r} \times \operatorname{rot} \vec{C}) = \frac{2}{c^2} \vec{C},$$

из которой следует нулевое граничное условие для \vec{C} :

$$\vec{C}(r_{\text{ip}}) = 0 \quad \text{при} \quad \vec{\Pi}(r_{\text{ip}}) = 0.$$

Утверждение 1. Плотность момента импульса волновых электромагнитных структур прямо пропорциональна векторному потенциалу вихревой составляющей вектора Пойнтинга.

Представим плотность момента импульса, обусловленной потенциальной составляющей вектора Пойнтинга, следующим образом:

$$l_\eta = \frac{1}{c^2} (\vec{r} \times \vec{\Pi}_\eta) = -\frac{1}{c^2} (\vec{r} \times \nabla \eta) = -\frac{1}{c^2} (\vec{r} \times \nabla) \eta = -\frac{1}{c^2} \hat{l} \eta;$$

$$\hat{l} = \vec{e}_x (y \frac{\partial}{\partial z} - z \frac{\partial}{\partial y}) + \vec{e}_y (z \frac{\partial}{\partial x} - x \frac{\partial}{\partial z}) + \vec{e}_z (x \frac{\partial}{\partial y} - y \frac{\partial}{\partial x}),$$
(5)

где \hat{l} – дифференциальный векторный оператор, используемый в квантовой теории для описания момента импульса. Раскрыв следующее векторное выражение в сферических координатах [7]:

$$(\vec{r} \times \nabla) = \frac{\partial \eta}{\partial \theta} (\vec{e}_r \times \vec{e}_\theta) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} (\vec{e}_r \times \vec{e}_\varphi) = \frac{\partial \eta}{\partial \theta} \vec{e}_\varphi - \frac{\vec{e}_\theta}{\sin \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi},$$

получим формулу для расчета момента импульса, обусловленного $\vec{\Pi}_\eta$:

$$\vec{L}_\eta = -\frac{1}{c^2} \int_V (\vec{r} \times \nabla \eta) dV = \frac{1}{c^2} \int_0^{r_0} r^2 dr \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} \left(\frac{\vec{e}_\theta}{\sin \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} - \frac{\partial \eta}{\partial \theta} \vec{e}_\varphi \right) d\varphi.$$

Переходим к декартовому базису и интегрируем по частям следующий интеграл:

$$\begin{aligned} & \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} \left\{ \left[(\vec{e}_x \cos \varphi + \vec{e}_y \sin \varphi) \frac{\cos \theta}{\sin \theta} - \vec{e}_z \right] \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} + (\vec{e}_x \sin \varphi - \vec{e}_y \cos \varphi) \frac{\partial \eta}{\partial \theta} \right\} d\varphi = \\ & = \int_0^\pi \cos \theta d\theta \int_0^{2\pi} (\vec{e}_x \cos \varphi + \vec{e}_y \sin \varphi) d\eta + \int_0^{2\pi} (\vec{e}_x \sin \varphi - \vec{e}_y \cos \varphi) d\varphi \int_0^\pi \sin \theta d\eta - \\ & \quad - \vec{e}_z \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\eta = \int_0^\pi \cos \theta d\theta \left[(\vec{e}_x \cos \varphi + \vec{e}_y \sin \varphi) \cdot \eta \Big|_0^{2\pi} + \right. \\ & \quad \left. + \int_0^{2\pi} (\vec{e}_x \sin \varphi - \vec{e}_y \cos \varphi) d\varphi \right] + \int_0^{2\pi} (\vec{e}_x \sin \varphi - \vec{e}_y \cos \varphi) d\varphi \left[\eta \cdot \sin \theta \Big|_0^\pi - \int_0^\pi \eta \cos \theta d\theta \right] - \\ & \quad - \vec{e}_z \int_0^\pi \sin \theta d\theta [\eta(2\pi) - \eta(0)] = \vec{e}_x \int_0^\pi \cos \theta d\theta [\eta(2\pi) - \eta(0)] - \\ & \quad - \vec{e}_z \int_0^\pi \sin \theta d\theta [\eta(2\pi) - \eta(0)] = 0. \end{aligned}$$

Функции $\eta(r, \theta, \varphi)$ выражается следующей формулой [7]:

$$\eta(\vec{r}) = \int_{V'} \frac{\text{div} \vec{\Pi}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV',$$

поэтому с учетом (3) разность $[\eta(\varphi = 2\pi) - \eta(\varphi = 0)] = 0$.

В итоге момент импульса от потенциальной составляющей вектора Пойнтинга равен нулю:

$$\vec{L}_\eta = 0. \quad (6)$$

Утверждение 2. Момент импульса волновых электромагнитных структур, описываемых функцией с разделенными переменными, создается

только вихревой составляющей вектора Пойнтинга.

Плотность момента импульса в (4) не содержит координатного вектора, поэтому по критерию из [2] вихревая составляющая вектора Пойнтинга реализует спиновый момент импульса.

Связанная с законом сохранения энергии потенциальная составляющая вектора Пойнтинга не создает момента импульса для волновой электромагнитной структуры, описываемой функцией с разделенными переменными. Если последнее условие не выполняется, то равенство (6) тоже не выполняется. В этом случае составляющая $\vec{\Pi}_\eta$ может создавать только орбитальный момент импульса, так как плотность момента импульса (5) содержит явные координатные зависимости.

Из утверждений 1 и 2 следует методический прием: можно определять физически адекватные моменты импульса волновых электромагнитных структур без использования закона сохранения энергии.

В [8] раскрыта волновая электромагнитная полевая структура

$$\langle A_{xy} \rangle_{T_0} = Y(\vec{e}_x \cos \psi + \vec{e}_y \sin \psi), \quad Y(r_{\text{rp}}) = 0 \text{ при } r_{\text{rp}} = \infty,$$

которая обуславливает $(m-1)$ -кратные моменты импульса, корректно дополняющие однократный классический момент импульса орбитального электрона до научно обоснованных в квантовой механике орбитальных моментов количества движения электронных оболочек атома, которые кратны азимутальному квантовому числу m . Однако для этой модели энергетические характеристики не определялись.

Здесь: $\langle A_{xy} \rangle_{T_0}$ – усредненная за период T_0 вращения орбитального электрона составляющая векторного потенциала; $Y = C_0 R(r) P(\theta)$ – произведение радиальной $R(r)$ и сферической $P(\theta)$ функций; C_0 – постоянная интегрирования; $\psi = m\varphi + \omega_{\text{cnt}} t + \varphi_x$ – фазовая функция, зависящая от азимутальной переменной φ и от времени t . В этой математической модели отсутствовала составляющая A_z .

Для полноты описания электромагнитной системы в целом в настоящей работе одновременно с моментом количества движения будет решаться задача определения энергетических характеристик.

III. Математическое моделирование

момента количества движения замкнутой волновой структуры

Для корректного описания энергетических характеристик рассматриваемой электромагнитной структуры восстановим составляющую A_z , которую определим из кулоновской калибровки:

$$\operatorname{div}\langle A_{xy} \rangle_{T_0} + \frac{\partial A_z}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

В результате векторный потенциал примет следующий вид:

$$\vec{A} = Y (\vec{e}_x \cos \psi + \vec{e}_y \sin \psi) + A_z \vec{e}_z, \quad (8)$$

Вычисляем дивергенцию $\langle A_{xy} \rangle_{T_0}$:

$$\begin{aligned} \operatorname{div}\langle A_{xy} \rangle_{T_0} &= C_0 \Lambda \cos(\psi - \varphi); \\ \Lambda &= P \frac{\partial R}{\partial r} \sin \theta + R \frac{\partial P}{r \partial \theta} + \frac{mRP}{\sin \theta}. \end{aligned} \quad (9)$$

На основе (7) и (9), и вследствие независимости азимутальной переменной φ от переменной z , структура неизвестной функции A_z должна иметь следующий вид:

$$\frac{\partial A_z}{\partial z} = -C_0 \Lambda \cos(\psi - \varphi); \quad A_z = A_{mz} \cos(\psi - \varphi). \quad (10)$$

Далее выразим составляющие в сферической системе координат [8]:

$$A_r = (Y \sin \theta + A_{mz} \cos \theta) \cos(\psi - \varphi) = A_{mr} \cos(\psi - \varphi); \quad (11)$$

$$A_\theta = (Y \cos \theta - A_{mz} \sin \theta) \cos(\psi - \varphi) = A_{m\theta} \cos(\psi - \varphi); \quad (12)$$

$$A_\varphi = Y(-\cos \psi \sin \varphi + \sin \psi \cos \varphi) = Y \sin(\psi - \varphi). \quad (13)$$

Вихревые составляющие электрического поля на основе (9) и (10) в декартовых и сферических координатах соответственно примут вид:

$$\begin{aligned} \vec{E} &= -\partial \vec{A} / \partial t = \omega_{cn} Y (\vec{e}_x \sin \psi - \vec{e}_y \cos \psi) + \vec{e}_z \omega_{cn} A_{mz} \sin(\psi - \varphi); \\ \vec{E} &= \vec{e}_r E_r + \vec{e}_\theta E_\theta + \vec{e}_\varphi E_\varphi; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} E_r &= E_{mr} \sin(\psi - \varphi); \quad E_\theta = E_{m\theta} \sin(\psi - \varphi); \quad E_\varphi = -E_{m\varphi} \cos(\psi - \varphi); \\ E_{mr} &= \omega_{cn} A_{mr}; \quad E_{m\theta} = \omega_{cn} A_{m\theta}; \quad E_{m\varphi} = \omega_{cn} Y. \end{aligned} \quad (15)$$

Составляющие магнитной индукции на основе (11)-(13) в декартовых и сферических координатах соответственно равны:

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} = \left[-\vec{e}_x \sin \psi + \vec{e}_y \cos \psi \right] \frac{\partial Y}{\partial z} + \left[\vec{e}_x \frac{\partial}{\partial y} - \vec{e}_y \frac{\partial}{\partial x} \right] A_{mz} \cos(\psi - \varphi) + \vec{e}_z C_0 \Lambda \sin(\psi - \varphi) = \vec{e}_x B_x + \vec{e}_y B_y + \vec{e}_z B_z; \quad (16)$$

$$B_x = A'_{mz} \sin \varphi \cos(\psi - \varphi) - \frac{(m-1)A_{mz}}{r \sin \theta} \cos \varphi \sin(\psi - \varphi) - \sin \psi \frac{\partial Y}{\partial z};$$

$$B_y = -A'_{mz} \cos \varphi \cos(\psi - \varphi) - \frac{(m-1)A_{mz}}{r \sin \theta} \sin \varphi \sin(\psi - \varphi) + \cos \psi \frac{\partial Y}{\partial z};$$

$$B_z = C_0 \Lambda \sin(\psi - \varphi); \quad A'_{mz} = \frac{\partial A_{mz}}{\partial r} \sin \theta + \frac{\partial A_{mz}}{r \partial \theta} \cos \theta;$$

$$\frac{\partial Y}{\partial z} = \frac{\partial Y}{\partial r} \cos \theta - \frac{\partial Y}{r \partial \theta} \sin \theta; \quad \frac{\partial A_{mz}}{\partial z} = \frac{\partial A_{mz}}{\partial r} \cos \theta - \frac{\partial A_{mz}}{r \partial \theta} \sin \theta; \quad (17)$$

$$\vec{B} = \vec{e}_r B_r + \vec{e}_\theta B_\theta + \vec{e}_\varphi B_\varphi; \quad (18)$$

$$B_r = B_{mr} \sin(\psi - \varphi); \quad B_\theta = B_{m\theta} \sin(\psi - \varphi); \quad B_\varphi = B_{m\varphi} \cos(\psi - \varphi);$$

$$B_{mr} = C_0 \Lambda \cos \theta - \sin \theta \left[\frac{\partial Y}{\partial z} + \frac{(m-1)A_{mz}}{r \sin \theta} \right]; \quad (19)$$

$$B_{m\theta} = -C_0 \Lambda \sin \theta - \cos \theta \left[\frac{\partial Y}{\partial z} + \frac{(m-1)A_{mz}}{r \sin \theta} \right]; \quad B_{m\varphi} = \left(\frac{\partial Y}{\partial z} - A'_{mz} \right). \quad (20)$$

Вектор Пойнтинга и его составляющие в сферических координатах:

$$\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H} = \vec{e}_r \Pi_r + \vec{e}_\theta \Pi_\theta + \vec{e}_\varphi \Pi_\varphi; \quad (21)$$

$$\Pi_r = \mu_0^{-1} (E_{m\theta} B_{m\varphi} - E_{m\varphi} B_{m\theta}) \sin(\psi - \varphi) \cos(\psi - \varphi) = 0, 5 \Pi_{mr} \sin 2(\psi - \varphi); \quad (22)$$

$$\Pi_\theta = \mu_0^{-1} (E_{m\varphi} B_{mr} - E_{mr} B_{m\varphi}) \sin(\psi - \varphi) \cos(\psi - \varphi) = 0, 5 \Pi_{m\theta} \sin 2(\psi - \varphi); \quad (23)$$

$$\Pi_\varphi = \mu_0^{-1} (E_{mr} B_{m\theta} - E_{m\theta} B_{mr}) \sin^2(\psi - \varphi) = \Pi_{m\varphi} \sin^2(\psi - \varphi). \quad (24)$$

Обозначая постоянную интегрирования C_z , вводим обозначения:

$$Y = C_0 Y_0; \quad A_{mz} = C_z A_{0z}; \quad \alpha_z = C_z / C_0, \quad (25)$$

Подставляем в $(E_{mr} B_{m\theta} - E_{m\theta} B_{mr})$ (15), (19), (20), получим:

$$\Pi_{m\varphi} = -\frac{\omega_{cn} C_0^2}{\mu_0} \left\{ Y_0 \Lambda + \alpha_z A_{0z} \left[\frac{\partial Y_0}{\partial z} + \frac{(m-1) \alpha_z A_{0z}}{r \sin \theta} \right] \right\}. \quad (26)$$

Используя (21)-(24), раскрываем векторное произведение $(\vec{e}_r \times \vec{\Pi})$ и перейдем к декартовому базису:

$$(\vec{e}_r \times \vec{\Pi}) = \vec{e}_\varphi 0,5 \Pi_{m\theta} \sin 2(\psi - \varphi) - \vec{e}_\theta \Pi_{m\varphi} \sin^2(\psi - \varphi) = \vec{e}_z \sin \theta \Pi_{m\theta} \sin^2(\psi - \varphi) - \cos \theta (\vec{e}_x \cos \varphi + \vec{e}_y \sin \varphi) \Pi_{m\varphi} \sin^2(\psi - \varphi) - 0,5 \Pi_{m\theta} \sin 2(\psi - \varphi) (\vec{e}_x \sin \varphi - \vec{e}_y \cos \varphi).$$

Учитывая ортогональность системы тригонометрических функций и независимость амплитуд $\Pi_{m\varphi}$ и $\Pi_{m\theta}$ от φ , вычислим следующий интеграл:

$$\int_0^{2\pi} (\vec{e}_r \times \vec{\Pi}) d\varphi = \vec{e}_z \pi \sin \theta \Pi_{m\theta}. \quad (27)$$

Подставив (27) в (26) и в (1), получим угловой момент импульса волновой электромагнитной структуры:

$$\vec{L}_{\Pi} = -\frac{\pi \omega_{cm} C_0^2 \vec{e}_z}{\mu_0 c^2} \int_0^\infty r^3 dr \int_0^\pi \sin^2 \theta \left\{ Y_0 \Lambda + \alpha_z A_{0z} \left[\frac{\partial Y_0}{\partial z} + \frac{(m-1) \alpha_z A_{0z}}{r \sin \theta} \right] \right\} d\theta. \quad (28)$$

Подставив (17) в (28) с учетом (25) и интегрируя по частям второе слагаемое с учетом равенства $r^3 Y_0(r = \infty) = 0$, получим:

$$\begin{aligned} & \alpha_z \int_0^\pi \sin^2 \theta \cos \theta d\theta \int_0^\infty A_{0z} r^3 \frac{\partial Y_0}{\partial r} dr - \alpha_z \int_0^\infty r^2 dr \int_0^\pi \sin^3 \theta A_{0z} \frac{\partial Y_0}{\partial \theta} d\theta = \\ & -\alpha_z \left[\int_0^\pi \sin^2 \theta \cos \theta d\theta \int_0^\infty Y_0 \left(3r^2 A_{0z} + r^3 \frac{\partial A_{0z}}{\partial r} \right) dr - \int_0^\infty r^2 dr \int_0^\pi Y_0 \left(3 \sin^2 \theta \cos \theta A_{0z} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \sin^3 \theta \frac{\partial A_{0z}}{\partial \theta} \right) d\theta \right] = -\alpha_z \int_0^\infty r^3 dr \int_0^\pi Y_0 \left(\frac{\partial A_{0z}}{\partial r} \cos \theta - \frac{\partial A_{0z}}{r \partial \theta} \sin \theta \right) d\theta = -\int_0^\infty r^3 dr \int_0^\pi Y_0 \frac{\partial A_{mz}}{\partial z} d\theta. \end{aligned}$$

Учитывая (10), последний интеграл приводится к следующему виду:

$$-\int_0^\infty r^3 dr \int_0^\pi Y_0 \frac{\partial A_{mz}}{\partial z} d\theta = \int_0^\infty r^3 dr \int_0^\pi Y_0 \Lambda d\theta. \quad (29)$$

Подставив (29) в (28), получим формулу расчета момента импульса, которую разбиваем на две части:

$$\vec{L}_{\Pi} = -\frac{\pi\omega_{cn}C_0^2\vec{e}_z}{\mu_0c^2} \int_0^{\infty} r^3 dr \int_0^{\pi} \sin^2\theta \left\{ 2Y_0\Lambda + \frac{(m-1)(\alpha_z A_{0z})^2}{r \sin\theta} \right\} d\theta = \vec{L}_{\Pi 1} + \vec{L}_{\Pi 2}. \quad (30)$$

В [8] показано, что интеграл от функции $Y_0\Lambda$ в (30) принимает вид:

$$\vec{L}_{\Pi 1} = -\frac{(m-1)\pi\omega_{cn}C_0^2\vec{e}_z}{\mu_0c^2} \int_0^{\infty} R^2 r^2 dr \int_0^{\pi} P^2 \sin\theta d\theta.$$

Подставив $\vec{L}_{\Pi 1}$ в (30) и учитывая $Y_0 = RP$, получим:

$$\vec{L}_{\Pi} = -\frac{2\pi(m-1)\omega_{cn}C_0^2\vec{e}_z}{\mu_0c^2} \int_0^{\infty} r^2 dr \int_0^{\pi} \sin\theta \left\{ Y_0^2 + \frac{(\alpha_z A_{0z})^2}{2} \right\} d\theta. \quad (31)$$

Проекция результирующего орбитального момента количества движения L_z на ось z будет состоять из момента импульса электромагнитного поля L_{Π} (31) и проекции на ось z орбитального момента импульса электрона, которая равна $-\hbar$. Знак минус указывает на то, что вектор Пойнтинга (21) – (24), (26) волновой электромагнитной структуры совпадает с направлением орбитального вращения электрона (по часовой стрелке). При этом результирующий орбитальный момент количества движения системы волнового ЭМП и электрона должен соответствовать научно-обоснованному значению:

$$L_z = L_{\Pi} - \hbar = -m\hbar.$$

Применив записанное условие к (31), определим постоянную интегрирования C_0^2 :

$$C_0^2 = \hbar\mu_0c^2 \left[2\pi\omega_{cn} \int_0^{\infty} r^2 dr \int_0^{\pi} \sin\theta \left\{ Y_0^2 + \frac{(\alpha_z A_{0z})^2}{2} \right\} d\theta \right]^{-1}. \quad (32)$$

Плотность энергии электрического поля на основе (26) равна:

$$w_E = 0,5\epsilon_0 \vec{E}^2 = 0,5\epsilon_0 \omega_{cn}^2 C_0^2 \left[Y_0^2 + (\alpha_z A_{0z})^2 \sin^2(\psi - \varphi) \right]$$

Формула электрической энергии поля с учетом (32) примет вид:

$$W_E = \pi \varepsilon_0 \omega_{cn}^2 C_0^2 \int_0^\infty r^2 dr \int_0^\pi (Y_0^2 + 0,5(\alpha_z A_{0z})^2) \sin \theta d\theta = 0,5 \hbar \omega_{cn}. \quad (33)$$

Энергию магнитной составляющей определим на основе преобразования типовой формулы следующим образом:

$$\begin{aligned} 2W_H &= \int_V (\vec{H} \cdot \vec{B}) dV = \int_V \vec{H} \operatorname{rot} \vec{A} dV = \int_V \operatorname{div} (\vec{A} \times \vec{H}) dV + \int_V \vec{A} \operatorname{rot} \vec{H} dV = \\ &= \oint_{S(r_{\text{гп}})} (\vec{A} \times \vec{H}) d\vec{S} + \varepsilon_0 \int_V \vec{A} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} dV = \varepsilon_0 \int_V \vec{A} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} dV. \end{aligned} \quad (34)$$

Здесь поверхностный интеграл вычисляется на границе области интегрирования, которая лежит на бесконечности, где $\vec{A}(r_{\text{гп}} = \infty) = 0$. При подстановке (8) и (14) в (34) формула энергии магнитного поля примет вид:

$$W_H = \pi \varepsilon_0 \omega_{cn}^2 C_0^2 \int_0^\infty r^2 dr \int_0^\pi (Y_0^2 + 0,5(\alpha_z A_{0z})^2) \sin \theta d\theta = 0,5 \hbar \omega_{cn}. \quad (35)$$

Полная энергия электромагнитной волновой структуры будет определяться только частотой колебания ω_{cn} электромагнитного процесса и, согласно (33) и (35), имеет простой вид:

$$W = W_E + W_H = \hbar \omega_{cn}.$$

IV. Обсуждение

Рассмотрен пример математического моделирования момента импульса, согласующегося с энергетическими характеристиками замкнутой волновой электромагнитной структуры, являющейся решением однородного волнового уравнения [8-9]. Эта модель позволяет реализовать многократный момент импульса, направление которого перпендикулярно азимутальному направлению циркуляции электромагнитной энергии волны (вдоль оси z). Это означает, что в такой электромагнитной структуре реализуется единственная форма момента импульса, которая подтверждается научными положениями, сформулированными в *утверждениях 1 и 2*.

Таким образом, критерии электромагнитных моментов импульса, базирующихся на понятиях вихревых и потенциальных характеристиках вектора Пойнтинга более конкретны по сравнению с критериями, основанными на первичных характеристиках поля в [1-5].

Получено, что замкнутая орбитальная электромагнитная волна характеризуется квантом энергии $\hbar\omega_{cn}$, где ω_{cn} частота колебания орбитального электромагнитного поля.

Рассмотрим физический смысл орбитальной замкнутой электромагнитной волны, определенной из решения однородного волнового дифференциального уравнения при кулоновской калибровке.

Однородные дифференциальные уравнения описывают свободные процессы физических систем, протекающие за счет внутренних запасов энергии, то орбитальное ЭМП должно образовываться за счет собственной энергии электрона.

При решении однородного волнового уравнения в [9] определено следующее выражение коэффициента при временной производной:

$$\omega_{cn}^2 \hbar^2 = 2m_0 c^2 [W_n - U(r)],$$

где $W_n, U(r) = U_n$ – полная и потенциальная энергии орбитального электрона на n энергетическом уровне соответственно. Из этого равенства получим следующее выражение кванта энергии замкнутой электромагнитной волны:

$$\begin{aligned} \hbar\omega_{cn} &= \sqrt{2W_{oe}(W_n - U_n)} = \sqrt{2W_{oe}|W_n|} = \sqrt{W_{oe}|U_n|}; \\ W_{oe} &= m_0 c^2; \quad U_n = -e^2(4\pi\epsilon_0 r_n)^{-1}, \end{aligned} \quad (36)$$

где m_0 – масса покоя электрона, W_{oe} – собственная энергия электрона.

В (36) с левой стороны представлена энергия замкнутой орбитальной электромагнитной волны. С правой стороны имеет место усредненная энергия от произведения собственной энергии электрона на модуль потенциальной энергии электрона в атоме.

V. Заключение

Вихревая составляющая вектора Пойнтинга волновой электромагнитной структуры является источником момента импульса, тогда как связанная с законом сохранения электромагнитной энергии потенциальная составляющая вектора Пойнтинга не создает момента импульса.

Разработана методика математического моделирования замкнутой электромагнитной волны, которая в рамках классической теории ЭМП позволила соединить описание орбитальных многократных моментов количества движения с квантовым описанием ее энергии.

Подтверждено научное положение, что источником энергии орбитальной замкнутой электромагнитной волны может являться только собственная энергия электрона, а физической причиной дискретных орбит электрона в атоме является наличие устойчивых замкнутых электромагнитных орбитальных волн, которые объясняют дискретность моментов количества движения и магнитных моментов.

© Меньшов Е.Н., 2025

Поступила в редакцию 30.08.2024

Принята к публикации 16.12.2024

Received 30.08.2024

Accepted 16.12.2024

Библиографический список

- [1] Allen L., Babiker M., Padgett M.J. IV The orbital angular momentum of light // *Progress in Optics*. 1999. № 39 (C). P. 291-372. DOI: 10.1016/S0079-6638(08)70391-3
- [2] Stewart A.M. Angular momentum of the electromagnetic field: The plane wave paradox resolved // *European Journal of Physics*. 2005. № 26 (4). P. 635-641. DOI: 10.1088/0143-0807/26/4/008
- [3] Cameron R.P., Speirits F.C., Gilson C.R., Allen L., Barnett S.M. The azimuthal component of Poynting's vector and the angular momentum of light // *Journal of Optics*. 2015. № 17 (12). P. 8. DOI: 10.1088/2040-8978/17/12/125610
- [4] Харитонов С.И., Волоотовский С.Г., Хонина С.Н. Вычисление момента импульса электромагнитного поля внутри волновода с абсолютно проводящими стенками // *Компьютерная оптика*. 2018. № 42 (4). С. 588-605. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-4-588-605
- [5] Barnett S.M., Allen L., Cameron R.P., Gilson C.R., Padgett M.J., Speirits F.C., Yao A.M. On the natures of the spin and orbital parts of optical angular momentum // *Journal of Optics*. 2016. № 18 (6). P. 11. DOI: 10.1088/2040-8978/18/6/064004
- [6] Болотовский Б.М. Оливер Хевисайд. М.: Наука, 1985. – 260 с.
- [7] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. – 831 с.
- [8] Меньшов Е.Н. Представление вектора Пойнтинга через электрические характеристики электротехнических систем. Часть 2. Моделирование плотности тока // *Интеллектуальная Электротехника*. 2022. № 2 (18). С. 30-45. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_30
- [9] Меньшов Е.Н. Расширение возможностей классической теории электромагнитного поля // *Научное обозрение. Физико-математические науки*. 2020. № 1. С. 4. [Электронный ресурс]. URL: <https://physics-mathematics.ru/ru/article/view?id=92> (дата обращения 30.06.2024). DOI: 10.17513/srpm.92

References

- [1] L. Allen, M. Babiker and M.J. Padgett, "IV The orbital angular momentum of light", *Progress in Optics*, vol. 39, no. C, pp. 291-372, 1999. DOI: 10.1016/S0079-6638(08)70391-3

- [2] A.M. Stewart, “Angular momentum of the electromagnetic field: The plane wave paradox resolved”, *European Journal of Physics*, vol. 26, no. 4, pp. 635-641, May 2005. DOI: 10.1088/0143-0807/26/4/008
- [3] R.P. Cameron, F.C. Speirits, C.R. Gilson, L. Allen and S.M. Barnett, “The azimuthal component of Poynting's vector and the angular momentum of light”, *Journal of Optics*, vol. 17, no. 12, pp. 8, Dec. 2015. DOI: 10.1088/2040-8978/17/12/125610
- [4] S.I. Kharitonov, S.G. Volotovskiy and S.N. Khonina, “Calculation of the angular momentum of an electromagnetic field inside a waveguide with absolutely conducting walls”, *Computer Optics*, vol. 42, no. 4, pp. 588-605, 2018. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-4-588-605
- [5] S.M. Barnett, L. Allen, R.P. Cameron, C.R. Gilson, M.J. Padgett, F.C. Speirits and A.M. Yao, “On the natures of the spin and orbital parts of optical angular momentum”, *Journal of Optics*, vol. 18, no. 6, pp. 11, 2018. DOI: 10.1088/2040-8978/18/6/064004
- [6] B.M. Bolotovskiy, *Oliver Heaviside [Oliver Heaviside]*. Moscow: Nauka, 1985 (in Russian).
- [7] G. Korn and T. Korn, *Mathematical handbook for scientists and engineers*. Moscow: Nauka, 1973.
- [8] E.N. Menshov, “Representation of the Poynting vector via electrical characteristics of electrical systems. Part 2. Simulation of current density”, *Smart Electrical Engineering*, vol. 2, no. 18, pp. 30-45, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_30
- [9] E.N. Menshov, “Expanding the capabilities of the classical theory of the electromagnetic field”, *Scientific Review. Physics and Mathematics*, no. 1, pp. 4, 2020. [Abstract]. Available at: <https://physics-mathematics.ru/ru/article/view?id=92>. DOI: 10.17513/srpm.92

Приложение А. Методика вычисления момента импульса.

Подынтегральную функцию в (4) можно представить в сферических координатах:

$$(\vec{r} \times \text{rot } \vec{C}) = \left[\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial C_r}{\partial \varphi} - \frac{\partial (rC_\varphi)}{\partial r} \right] \vec{e}_\varphi + \left[\frac{\partial C_r}{\partial \theta} - \frac{(rC_\theta)}{\partial r} \right] \vec{e}_\theta,$$

и проинтегрировать интеграл по частям:

$$\begin{aligned} \vec{L}_C &= \frac{1}{c^2} \int_0^{r_p} r^2 dr \left\{ \int_0^\pi d\theta \int_0^{2\pi} \vec{e}_\varphi dC_r + \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \vec{e}_\theta \sin \theta dC_r \right\} - \\ &- \frac{1}{c^2} \int_0^\pi \sin \theta d\theta \left\{ \int_0^{2\pi} \vec{e}_\varphi d\varphi \int_0^{r_p} r^2 d(rC_\varphi) + \int_0^{2\pi} \vec{e}_\theta d\varphi \int_0^{r_p} r^2 d(rC_\theta) \right\} = \\ &= \frac{1}{c^2} \int_0^{r_p} r^2 dr \left\{ \int_0^\pi d\theta \left[\vec{e}_\varphi C_r \Big|_0^{2\pi} - \int_0^{2\pi} C_r \frac{\partial \vec{e}_\varphi}{\partial \varphi} d\varphi \right] + \int_0^{2\pi} d\varphi \left[\vec{e}_\theta C_r \sin \theta \Big|_0^\pi - \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \int_0^\pi C_r \left(\vec{e}_\theta \cos \theta + \sin \theta \frac{\partial \vec{e}_\theta}{\partial \theta} \right) d\theta \left\{ - \frac{1}{c^2} \int_0^\pi \sin \theta d\theta \left[\int_0^{r_{\text{гп}}} \vec{e}_\varphi d\varphi \left[r^3 C_\varphi \Big|_0^{r_{\text{гп}}} - 2 \int_0^{r_{\text{гп}}} r^2 C_\varphi dr \right] + \right. \right. \\
& \left. \left. + \int_0^{2\pi} \vec{e}_\theta d\varphi \left[r^3 C_\theta \Big|_0^{r_{\text{гп}}} - 2 \int_0^{r_{\text{гп}}} r^2 C_\theta dr \right] \right\} = \frac{1}{c^2} \int_0^{r_{\text{гп}}} r^2 dr \left[2 \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} (C_\theta \vec{e}_\theta + C_\varphi \vec{e}_\varphi) d\varphi - \right. \\
& \left. - \int_0^\pi d\theta \int_0^{2\pi} C_r \left(\frac{\partial \vec{e}_\varphi}{\partial \varphi} + \vec{e}_\theta \cos \theta + \sin \theta \frac{\partial \vec{e}_\theta}{\partial \theta} \right) d\varphi \right] = \frac{2}{c^2} \int_V (C_r \vec{e}_r + C_\theta \vec{e}_\theta + C_\varphi \vec{e}_\varphi) dV.
\end{aligned}$$

При вычислении \vec{L}_c использовалось исходное граничное условие $C(r_{\text{гп}}) = 0$ и учитывались следующие преобразования [7]:

$$\frac{\partial \vec{e}_\theta}{\partial \theta} = -\vec{e}_r; \quad \frac{\partial \vec{e}_\varphi}{\partial \varphi} + \vec{e}_\theta \cos \theta + \sin \theta \frac{\partial \vec{e}_\theta}{\partial \theta} = -2 \sin \theta \vec{e}_r.$$

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Меньшов Евгений Николаевич, **Eugene N. Menshov**, D. Sci (Eng.), доктор технических наук, профессор Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Российская Федерация, professor of the Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation.

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

SMART ELECTRICAL ENGINEERING

№ 1

Nizhny Novgorod 2025

The journal is issued 4 times in year

Editor-in-Chief A.B. Loskutov

EDITORIAL STAFF

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

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

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

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

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

ISSN 2658-6754

© Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 2025

CONTENT

| | |
|--|-----------|
| ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS | 4 |
| V.V. Vanyaev, V.V. Sokolov, A.B. Dar`enkov, A.V. Kukushkin, I.E. Berdnikov, A.P. Sluzov, A.E. Khramov. Modular power supply system for deep-sea unmanned vehicles..... | 4 |
| A.L. Kulikov, V.L. Osokin, D.A. Levakov. Comparative analysis and prospects for development of distance methods for overhead catenary network fault location. Part 1..... | 16 |
| L.A. German, K.S. Subkhanverdiev, I.P. Karpov. Formation of equivalent circuit for power supply system of traction substations..... | 36 |
| A.A. Loskutov. Specific features of recognizing modes functioning of power supply systems for industrial consumers with distributed generation facilities..... | 50 |
| S.V. Popov, O.A. Burmakin, Y.S. Malyshev. Recommendations for determining the matching transformer power electric drive of anchoring mechanism..... | 70 |
| Y.Y. Skorokhod. Performance analysis of synchronous and asynchronous control methods on quality of current consuming by converter..... | 81 |
| POWER INDUSTRY | 93 |
| A.O. Rogozhnikov, O.A. Belov. Universal simulator for practicing practical skills of ship power plant operators using software simulation..... | 93 |
| E.N. Menshov. Representation of the Poynting vector via electrical characteristics of electrical systems. Part 3. The vortex component of the Poynting vector..... | 105 |

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 1

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

Редакция:

603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24
smart_electric@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать 18.03.2025. Дата выхода в свет: 28.03.2025

Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

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

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

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