

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 2

Нижний Новгород 2022

УДК 621.3

ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2022. № 2 (18). – 139 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 д.т.н., проф. А.Б. Лоскутов

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:

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

Анатолий Викторович Кузнецов

д-р техн. наук, профессор

Александр Леонидович Куликов

д-р техн. наук, профессор

Виктор Николаевич Мещеряков

д-р техн. наук, профессор

Георгий Борисович Онищенко

д-р техн. наук, профессор

Александр Сергеевич Плехов

канд. техн. наук, доцент

Александр Юрьевич Смирнов

д-р техн. наук, доцент

Vitezslav Styskala

д-р техн. наук, профессор (Чехия)

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

Roustiam Chakirov

д-р техн. наук, профессор (Германия)

Учредитель и издатель:

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

(603950, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

Электронная версия журнала:
<https://ie.mntu.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, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ.....	4
Попов А.А., Онищенко Г.Б., Гуляев И.В. Анализ быстродействия системы управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с оптимизацией по минимуму тока статора.....	4
Нго К.К., Нгуен В.Н., То В.Н., Нгуен В.К., Лыонг Ч.Ш., Доан Т.Ф., Фам М.Т., Нгуен Т.Т. Производство твердого электролита $\text{NA}_3\text{ZR}_2\text{SI}_2\text{PO}_{12}$ для натрий-ионного аккумулятора.....	16
Меньшов Е.Н. Представление вектора Пойнтинга через электрические характеристики электротехнических систем. Часть 2. Моделирование плотности тока.....	30
Лившиц В.И. Открытие электромагнитных вращений в распределенных индуктивно-емкостных структурах и новое направление в электромеханике.....	46
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА	80
Герман Л.А., Субханвердиев К.С. Расчет системы тягового электропитания 25 кВ по программе РАСТ-05К с учетом взаимоиндукции тяговых сетей.....	80
Новиков Н.Л., Жалилов Р.Б., Новиков А.Н. Разработка систем управления реального времени комплектных трансформаторных подстанций 6-10/0,4 кВ.....	94
Жарков Ю.И., Попова Н.А., Фигурнов Е.П. Методы контроля безопасности железнодорожных линий электропередачи напряжением до 35 кВ.....	111
Лоханин Е.К. К вопросу о моделировании синхронных и асинхронизированных электрических машин при расчетах установившихся и переходных режимов энергосистем.....	121
ХРОНИКА.....	132
ХIII Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи».....	132

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.313.333.2:62-503.56

DOI 10.46960/2658-6754_2022_2_04

**АНАЛИЗ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ
С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ
С ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПО МИНИМУМУ ТОКА СТАТОРА****А.А. Попов**

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
Саранск, Россия
e-mail: alalpopov91@mail.ru

Г.Б. Онищенко

ООО «Научно-технический центр Приводная Техника»
Москва, Россия
e-mail: eapu@mail.ru

И.В. Гуляев

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
Саранск, Россия
e-mail: ivgulyaev@mail.ru

Достижения в развитии силовых полупроводниковых приборов (СПП) и микропроцессорной техники позволяют повышать эффективность современных систем управления электроприводом. Во многих промышленных и транспортных секторах в широком диапазоне напряжений и мощностей одним из самых распространенных является регулируемый электропривод с применением асинхронного двигателя (АД). Одной из основных задач управления АД является управление положения рабочей точки машины, т.е. управление крутящим моментом и потокосцеплением ротора. Требования к крутящему моменту АД определяются областью его применения, но в случае, когда машина работает не на пределе своего крутящего момента, сохраняется свобода выбора уровня потока ротора, что дает дополнительные преимущества в управлении электроприводом.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, динамика электропривода, МТРА, моделирование, энергоэффективное управление.

Для цитирования: Попов А.А., Онищенко Г.Б., Гуляев И.В. Анализ быстродействия системы управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с оптимизацией по минимуму тока статора // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 2. С. 4-15. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_04

ANALYSIS OF PERFORMANCE OF CONTROL SYSTEM FOR SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTOR WITH OPTIMIZATION FOR MINIMUM OF STATOR CURRENT

A.A. Popov

National Research Mordovia State University
Saransk, Russia
e-mail: alalpopov91@mail.ru

G.B. Onishchenko

LLC "Scientific and Technical Center Drive Technology"
Moscow, Russia
e-mail: eapu@mail.ru

I.V. Gulyaev

National Research Mordovia State University
Saransk, Russia
e-mail: ivgulyaev@mail.ru

Abstract. Modern advances in the development of power semiconductor devices (PSD) and microprocessor technology make it possible to increase the efficiency of modern electric drive control systems. In many industrial and transport sectors in a wide range of voltages and powers, one of the most common can be considered a controlled electric drive using an induction motor (IM). One of the main tasks of IM control is to control the position of the operating point of the machine, i.e., control of torque and rotor flux linkage. The requirements for the torque of the IM are determined by the scope of its application, but in the case when the machine does not operate at the limit of its torque, the freedom to choose the level of the rotor flux remains, which gives additional advantages in the control of the electric drive.

Key words: induction drive, electric drive dynamics, MTPA, simulation, energy efficient control.

For citation: A.A. Popov, G.B. Onishchenko and I.V. Gulyaev, "Analysis of performance of control system for squirrel-cage induction motor with optimization for minimum of stator current", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 4-15, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_04

1. Введение

Одним из базовых методов управления асинхронным двигателем (АД) с короткозамкнутым ротором является использование полеориентированного управления (ПОУ). Наиболее распространено ПОУ с номинальным значением потокоцепления ротора и скоростью ниже номинальной при соблюдении закона $1/\omega_r$ (или аналогичного) в области ослабления поля. Такой подход к управлению позволяет повысить динамику электропривода, но повышает потери, что не лучшим образом влияет на энергоэффективность электропривода при длительной работе или при работе с малыми нагрузками на валу [1-4]. Для повышения энергоэффективности можно снизить потокоцепление ротора в таких режимах, но это повлечет за собой снижение динамики [1-4].

Для достижения баланса между быстродействием и энергоэффективностью можно использовать метод управления по максимуму момента на единицу тока (*maximum torque per ampere* – *МТРА*). На рис. 1 показана оптимальная траектория токов при стратегии *МТРА* (без учета потерь).

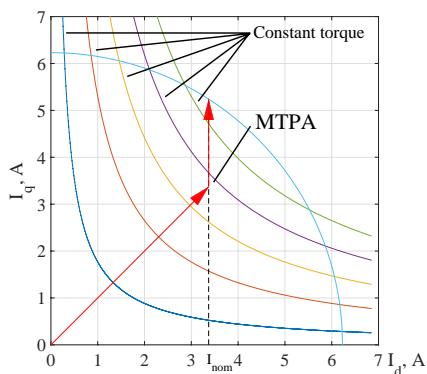


Рис. 1. Траектория токов при стратегии *МТРА*

Fig. 1. Current trajectory for *МТРА* strategy

В [5] выполнено сравнение работы алгоритмов управления на базе *МТРА* и системы управления с поддержанием постоянного потокоцепления ротора. На текущий момент стратегия управления *МТРА* рассматривает только установившиеся режимы работы электропривода, но с учетом потерь и изменений основных параметров машины во время работы. Влияние переходных процессов в системе управления *МТРА* и ее влияние на динамику электропривода изучаются.

Для повышения динамики электропривода при управлении *МТРА*

требуется форсировать процесс намагничивания ротора АД с короткозамкнутым ротором, за счет имеющегося запаса по току. Для обеспечения баланса между энергетической эффективностью и динамикой электропривода можно использовать регулятор потока в системе управления, схема системы управления представлена на рис. 2.

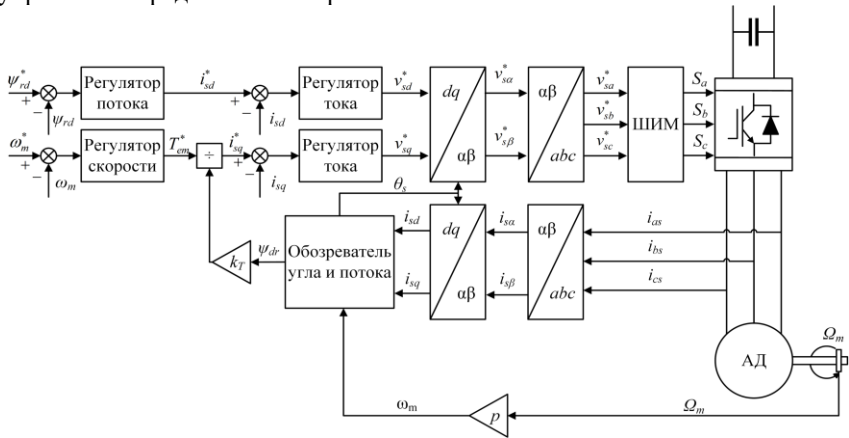


Рис. 2. Система управления с МТРА регулятором потока

Fig. 2. Control system with MTPA flux controller

Максимальная энергоэффективность электропривода будет достигнута только в установившихся режимах работы. В таком случае необходимую величину тока по оси d можно определить по формуле:

$$i_{sd} = \frac{\Psi_r}{L_m}, \quad (1)$$

где Ψ_r – потокосцепление ротора; L_m – индуктивность намагничивания.

По результатам математического моделирования предлагаемых методов было проведено сравнение двух систем управления с применением стратегии МТРА без регулятора потока и с применением регулятора. Моделирование проводилось на базе модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором *ABB M2AA100LC4* мощностью 2,2 кВт.

При исследовании рабочих характеристик АД с использованием уравнений электрического равновесия были приняты следующие допущения:

1) все обмотки АД симметричны и имеют одинаковые параметры;

- 2) распределение МДС принимается синусоидальным;
- 3) насыщение магнитной системы не учитывается;
- 4) не учитываются магнитные и механические потери.

Для моделирования работы АД в среде *MATLAB* использовались уравнения асинхронного двигателя в синхронной вращающейся системе координат, ориентированной по потокосцеплению ротора:

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s \sigma L_s i_{sq} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_{rd}}{dt}; \quad (2)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s \sigma L_s i_{sd} + \omega_s \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd}; \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{1 - L_m^2}{L_s L_r}, \quad (4)$$

где u_{sd} и u_{sq} – потокосцепления ротора в синхронной вращающейся системе координат dq ; R_s – сопротивление статора; i_{sd} и i_{sq} – токи статора в синхронной вращающейся системе координат dq ; L_s – индуктивность статора; L_r – индуктивность ротора; ψ_{rd} и ψ_{rq} – потокосцепление ротора в синхронной вращающейся системе координат dq .

На представленных далее графиках основные величины: i_d и i_q – токи статора в синхронной вращающейся системе координат dq ; i_{mr} – ток намагничивания ротора и T_{em} – электромагнитный крутящий момент; указаны в относительных единицах и рассчитываются как отношение текущего значения к номинальному значению величины. Номинальные значения величин приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Параметры модели АД ABB M2AA100LC4

Table 1.
Parameters of the ABB M2AA100LC4 IM model

Параметр	Значение
Ток оси d I_d , А	3,37
Ток оси q I_q , А	5,24
Ток намагничивания I_{mr} , А	3,37
Сопротивление статора R_s , Ом	2,35
Сопротивление ротора R_r , Ом	1,99
Индуктивность статора L_s , Гн	0,295
Индуктивность ротора L_r , Гн	0,295
Индуктивность намагничивания L_m , Гн	0,284

При моделировании рассматривались два случая:

- 1) изменение команды момента от текущего значения к номинальной величине крутящего момента, результаты моделирования приведены на рис. 3 (а) и (б);
- 2) изменение команды момента от текущего значения к 0,7 от номинальной величины крутящего момента, результаты моделирования приведены на рис. 4(а) и 4(б).

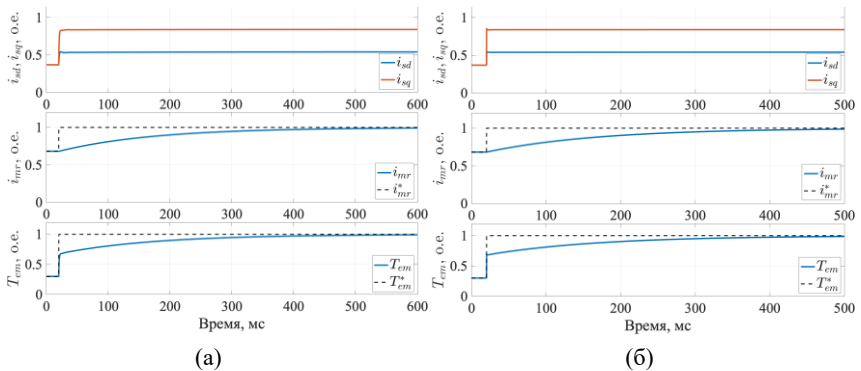


Рис. 3. Результаты моделирования АД с МТРА ниже номинального потока от 0,3 до номинального момента: без регулятора потока (а); с регулятором потока (б)

Fig. 3. IM with MTPA below nominal flux simulation results from 0,3 to nominal torque: without flux controller (a); with flux controller (b)

При рассмотрении результатов моделирования первого случая можно отметить практически идентичную динамику обеих систем управления, ввиду того что в данном случае динамика зависит только от скорости намагничивания ротора электродвигателя. Во втором рассматриваемом случае система управления, в которой применен регулятор потока, показывает большую динамику в сравнении с системой без такого регулятора. Такое поведение можно объяснить тем, что в данном случае регулятор потока способен использовать запас по току, чтобы форсировать намагничивание ротора электродвигателя.

II. Альтернативный метод управления

Так как для максимальной динамики требуется поддержание пото-

косцепления ротора на скоростях ниже номинальной равным его номинальному значению, а для повышения энергоэффективности нужно поддерживать его значение ниже этого значения, то можно предположить, что есть некое компромиссное решение. Данное решение должно обеспечивать энергоэффективность в установившихся режимах в соответствии со стратегией *МТРА* и обеспечивать достаточную динамику при переходе из одного установившегося режима в другой.

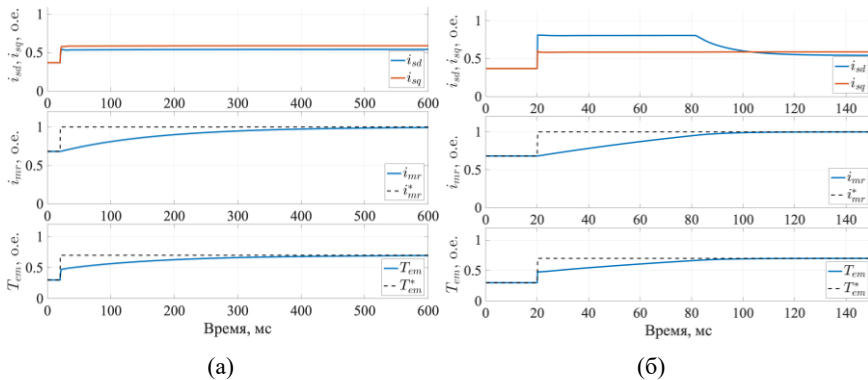


Рис. 4. Результаты моделирования АД с *МТРА* ниже номинального потока от 0,3 до 0,7 от номинального момента: без регулятора потока (а); с регулятором потока (б)

Fig. 4. IM with MTPA below nominal flux simulation results from 0,3 to 0,7 of nominal torque: without flux controller (a); with flux controller (b)

Как уже отмечалось ранее, для повышения динамики энергоэффективного управления необходимо максимально быстро намагнитить ротор, т.к. ток по оси q может измениться практически мгновенно, а вот ток намагничивания ротора – не может. Но одновременное нарастание крутящего момента и потокосцепления ротора может отразиться на системе управления таким образом, что реакция регуляторов будет отличаться от ожидаемой [6–10]. Это связано с наличием ограничений по току и напряжению используемого преобразователя частоты.

При работе в области низких скоростей ограничениями по напряжению можно пренебречь. Рассматривая работу на низких скоростях, можно предложить два варианта увеличения скорости намагничивания ротора:

1) при изменении команды момента сохранить ток по оси q без изменений

до момента достижения потокосцепления ротора необходимого значения, для чего можно использовать весь запас по току для увеличения тока по оси d . После чего значения токов по осям d и q установить в соответствии с расчетными значениями для заданной команды момента. Результаты моделирования представлены на рис. 5, а, где i_{mr} отвечает за динамику потока ротора;

- 2) при изменении команды момента сохранить крутящий момент без изменений до момента достижения потокосцепления ротора необходимого значения, для чего можно использовать весь запас по току для увеличения тока по оси d . После чего значения токов по осям d и q установить в соответствии с расчетными значениями для заданной команды момента. Результаты моделирования представлены на рис. 5, б, где i_{mr} отвечает за динамику потока ротора.

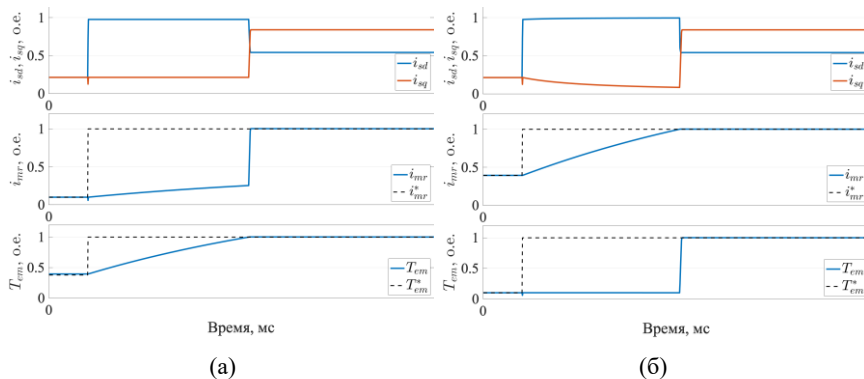


Рис. 5. Реакция потока и момента на изменение команды управления при использовании двух алгоритмов работы: поддержание постоянного тока по оси q (а); поддержание постоянного момента (б)

Fig. 5. Response of the flux and torque to a change in the control command when using two operation algorithms: maintaining a constant current along the q axis (a); maintaining a constant moment (b)

В приведенных результатах моделирования нагрузка на двигателе составляет 10 % от номинального значения с токами $i_d = i_q$ в соответствии со стратегией управления МТРА, через 20 мс нагрузка (команда момента) увеличивается до номинального значения.

Данные результаты показывают, что оба предложенных варианта

позволяют существенно увеличить динамику электропривода, но при этом появляется резкий скачок крутящего момента. Подобное резкое изменение крутящего момента может пагубно повлиять на механические составляющие электропривода. Для исправления данной ситуации может быть целесообразным использование постепенно нарастающей команды момента, например, в виде наклонной прямой, что уменьшит механическую нагрузку на электропривод, но увеличит время достижения заданного момента.

III. Экспериментальные результаты

Предложенные алгоритмы были экспериментально проверены на асинхронном двигателе мощностью 2,2 кВт. Испытательный стенд также включает в себя синхронную машину с постоянными магнитами ДСМ71-2,2-1500, работающую в качестве нагрузки и датчик момента DR-2643. В качестве источников питания двигателей используются два преобразователя частоты с открытой программной платформой на базе микроконтроллера TMS320F28335. На рис. 6 (а) представлены экспериментальные данные для алгоритма, поддерживающего ток по оси q постоянным до намагничивания ротора. На рис. 6 (б) представлены экспериментальные данные для алгоритма, поддерживающего крутящий момент постоянным до намагничивания ротора. На рис. 6 (в) представлены экспериментальные данные для алгоритма, рассчитывающего команду крутящего момента в виде наклонной прямой.

Сравнивая экспериментальные данные с данными моделирования, можно отметить, что результаты, полученные на экспериментальной установке, показывают достоверность разработанного алгоритма управления.

III. Выводы

Проведен анализ быстродействия системы управления АД с оптимизацией по минимуму тока статора с применением регулятора потока и без. Установлено, что динамика крутящего момента зависит от величины команды управления крутящим моментом. В случае, когда команда момента равна номинальному значению, динамика изменения момента почти одинакова, при команде момента меньше номинального значения, система управления с регулятором потока обладает наилучшей динамикой. Предложены несколько алгоритмов, которые позволяют использовать имеющийся запас тока для форсирования намагничивания ротора АД. В момент изменения команды управления крутящим моментом АД один алгоритм старается поддерживать начальное значение момента, а другой ток по оси q до тех пор, пока магнитный поток ротора не достигнет необходимого значения. После достижения потоком ротора требуемого значения, команды управления токов устанавливаются в соответствии с заданными значениями для установленного режима. Данные алгоритмы позволяют добиться высокой динамики крутящего момента, что создает резкий скачок момента на валу АД и

плохо сказывается на механической трансмиссии привода. Исходя из этого, предложено использовать профилированную команду управления моментом в виде наклонной прямой. Экспериментальные исследования подтвердили теоретическую составляющую предложенных методов.

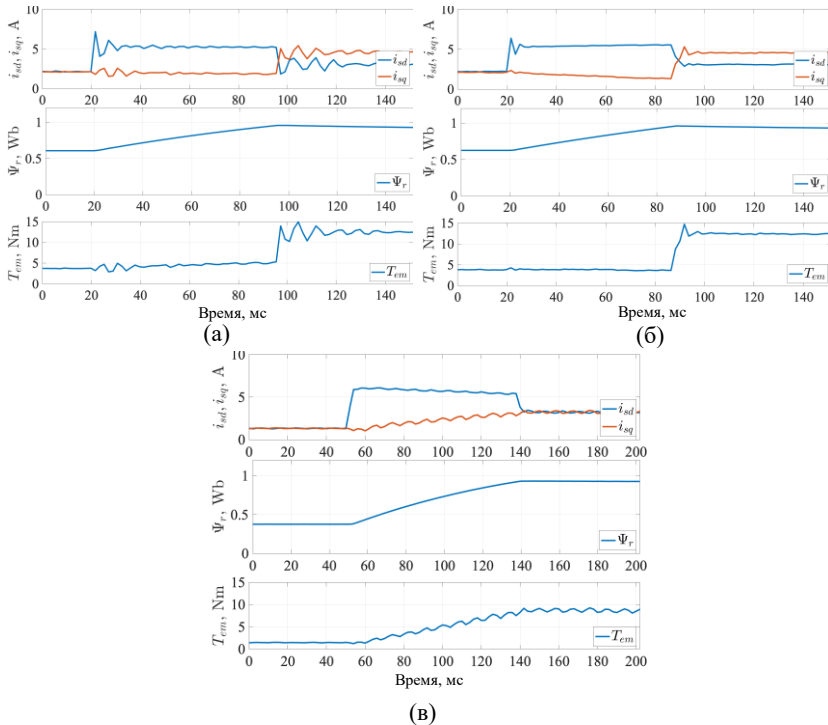


Рис. 6. Экспериментальные данные для трех алгоритмов работы: поддержание постоянного тока по оси q (а); поддержание постоянного момента (б); использование команды момента в виде наклонной прямой (в)

Fig. 6. Experimental results when using two operation algorithms: maintaining a constant current along the q axis (a); maintaining a constant moment (b); using torque ramp command (c)

© Попов А.А., 2022
 © Онищенко Г.Б., 2022
 © Гуляев И.В., 2022

Поступила в редакцию 28.03.2022
 Received 28.03.2022

Библиографический список

- [1] Tsai M.S., Wu M.J., Tu T.C., Chou B.Y. Implementation of maximum torque per amperage control using estimation technique of rotor time constant // proc. CACS International Automatic Control Conference (CACS), Dec. 2-4, 2013, Sun Moon Lake, Taiwan. IEEE, 2013. pp. 278-281. DOI: 10.1109/CACS.2013.6734146
- [2] Kwon C., Suhdooff S.D. An adaptive maximum torque per ampere control strategy // IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, May 15, 2005, San Antonio, TX, USA. IEEE, 2005. P. 783-788. DOI: 10.1109/IEMDC.2005.195811
- [3] Hrkel M., Vittek J., Biel Z. Maximum torque per ampere control strategy of induction motor with iron losses // 2012 ELEKTRO, May 21-22, 2012, Rajecke Teplice, Slovakia. IEEE, 2012. pp. 185-190. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2012.6225635
- [4] Bozhko S., Dymko S., Kovbasa S., Peresada S.M., Maximum torque-per-ampere control for traction in drives: Theory and experimental results // IEEE Transactions on Industry Applications. 2017. Vol. 53. No. 1. P. 181-193. DOI: 10.1109/TIA.2016.2608789
- [5] Kwon C. Study on an adaptive maximum torque per amp control strategy for induction motor drives // Journal of Electrical Engineering and Technology. 2013. Vol. 8. No. 1. P. 110-117. DOI: 10.5370/JEET.2013.8.1.110
- [6] Briz F., Diez A., Degner M.W., Lorenz R.D. Current and flux regulation in field-weakening operation [of induction motors] // IEEE Transactions on Industry Applications. 2001. Vol. 37. No 1. P. 42-50. DOI: 10.1109/28.903125
- [7] Harnefors L., Pietilainen K., Gertmar L. Torque-maximizing field-weakening control: design, analysis, and parameter selection // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2001. Vol. 48. No 1. P. 161-168. DOI: 10.1109/41.904576
- [8] Kim S.-H., Sul S.-K. Maximum torque control of an induction machine in the field weakening region // IEEE Transactions on Industry Applications. 1995. Vol. 31. No 4. P. 787-794. DOI: 10.1109/28.395288
- [9] Kwon Y.-C., Kim S., Sul S.-K. Six-step operation of PMSM with instantaneous current control // IEEE Transactions on Industry Applications. 2014. Vol. 50. No 4. P. 2614-2625. DOI: 10.1109/TIA.2013.2296652
- [10] Vasilios I.C., Nikolaos M.I. A novel SVPWM overmodulation technique based on voltage correcting function // proc. 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), June 25-28, 2012, Aalborg, Denmark. IEEE, 2012. P. 682-689. DOI: 10.1109/PEDG.2012.6254076

References

- [1] M.S. Tsai, M.J. Wu, T.C. Tu and B.Y. Chou, "Implementation of maximum torque per amperage control using estimation technique of rotor time constant", in proc. *CACS International Automatic Control Conference (CACS)*, Dec. 2-4, 2013, Sun Moon Lake, Taiwan, pp. 278-281. DOI: 10.1109/CACS.2013.6734146
- [2] C. Kwon and S.D. Suhdooff, "An adaptive maximum torque per ampere control strategy", in proc. *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, May 15, 2005, San Antonio, TX, USA, pp. 783-788. DOI: 10.1109/IEMDC.2005.195811

- [3] M. Hrkel, J. Vittek and Z. Biel, "Maximum torque per ampere control strategy of induction motor with iron losses", in proc. 2012 ELEKTRO, May 21-22, 2012, Rajce Teplice, Slovakia, pp. 185-190. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2012.6225635
- [4] S. Bozhko, S. Dymko, S. Kovbasa and S.M. Peresada, "Maximum torque-per-ampere control for traction in drives: Theory and experimental results", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 1, pp. 181-193, Jan.-Feb. 2017. DOI: 10.1109/TIA.2016.2608789
- [5] C. Kwon, "Study on an adaptive maximum torque per amp control strategy for induction motor drives", *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 110-117, Jan. 2013. DOI: 10.5370/JEET.2013.8.1.110
- [6] F. Briz, A. Diez, M.W. Degner and R.D. Lorenz, "Current and flux regulation in field-weakening operation [of induction motors]", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no 1, pp. 42-50, Jan.-Feb. 2001. DOI: 10.1109/28.903125
- [7] L. Harnefors, K. Pietilainen and L. Gertmar, "Torque-maximizing field-weakening control: design, analysis, and parameter selection", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 48, no 1, pp. 161-168, Feb. 2001. DOI: 10.1109/41.904576
- [8] S.-H. Kim and S.-K. Sul, "Maximum torque control of an induction machine in the field weakening region", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no 4, pp. 787-794, July-Aug. 1995. DOI: 10.1109/28.395288
- [9] Y.-C. Kwon, S. Kim and S.-K. Sul, "Six-step operation of PMSM with instantaneous current control", *Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no 4, pp. 2614-2625, July-Aug. 2014. DOI: 10.1109/TIA.2013.2296652
- [10] I.C. Vasilios and M.I. Nikolaos, "A novel SVPWM overmodulation technique based on voltage correcting function", in proc. 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), June 25-28, 2012, Aalborg, Denmark, pp. 682-689. DOI: 10.1109/PEDG.2012.6254076

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Попов Александр Александрович, инженер Национального исследовательского Мордовского государственного университета, г. Саранск, Российская Федерация.

Онищенко Георгий Борисович, доктор технических наук, профессор, научный руководитель ООО «Научно-технический центр Приводная Техника», г. Москва, Российская Федерация.

Гуляев Игорь Васильевич, доктор технических наук, профессор, руководитель НОЦ Национального исследовательского Мордовского государственного университета, г. Саранск, Российская Федерация.

Alexander A. Popov, engineer of the National Research Mordovia State University, Saransk, Russian Federation.

Georgiy B. Onishchenko, D. Sci. (Eng.), professor, scientific supervisor of the LLC "Scientific and Technical Center Drive Technology", Moscow, Russian Federation.

Igor V. Gulyaev, D. Sci. (Eng.), professor, head of science and research center of the National Research Mordovia State University, Saransk, Russian Federation.

УДК 621.355.9

DOI 10.46960/2658-6754_2022_2_16

**ПРОИЗВОДСТВО ТВЕРДОГО ЭЛЕКТРОЛИТА
 $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ ДЛЯ НАТРИЙ-ИОННОГО
АККУМУЛЯТОРА**

К.К. Нго

Технологический университет имени Лэ Куи Дона
Ханой, Вьетнам
e-mail: quyenkazan@gmail.com

В.Н. Нгуен

Ханойский архитектурный университет
Ханой, Вьетнам
e-mail: quyenkazan@gmail.com

В.Н. То

Технологический университет имени Лэ Куи Дона
Ханой, Вьетнам
e-mail: quyenkazan@gmail.com

В.К. Нгуен

Технологический университет имени Лэ Куи Дона
Ханой, Вьетнам
e-mail: quyenkazan@gmail.com

Ч.Ш. Лыонг

Технологический университет имени Лэ Куи Дона
Ханой, Вьетнам
e-mail: quyenkazan@gmail.com

Т.Ф. Доан

Технологический университет имени Лэ Куи Дона
Ханой, Вьетнам
e-mail: quyenkazan@gmail.com

М.Т. Фам

Технологический университет имени Лэ Куи Дона
Ханой, Вьетнам
e-mail: quyenkazan@gmail.com

Т.Т. Нгуен

Вьетнамская Академия наук и технологий
Ханой, Вьетнам
e-mail: quyenkazan@gmail.com

Представлены результаты исследования влияния условий изготовления и работы на электропроводность твердого электролита $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$. Давление гранулирования перед спеканием сильно влияет на чистоту, а также на проводимость электролита. При давлении прессования 8 тонн/см² электролит имеет наибольшую электропроводность при комнатной температуре. Результаты исследования показали, что твердый электролит $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ имеет наибольшую электропроводность при работе при температуре 100 °С.

Ключевые слова: натрий-ионный аккумулятор, твердый электролит, $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$.

Для цитирования: Нго К.К., Нгуен В.Н., То В.Н., Нгуен В.К., Лыонг Ч.Ш., Доан Т.Ф., Фам М.Т., Нгуен Т.Т. Производство твердого электролита $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ для натрий-ионного аккумулятора // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 2. С. 16-29. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_16

PRODUCTION OF SOLID ELECTROLYTE $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ FOR SODIUM-ION BATTERY

Q.Q. Ngo

Le Qui Don Technological University
Hanoi, Vietnam
e-mail: quyenkazan@gmail.com

V.N. Nguyen

Hanoi University of Architecture
Hanoi, Vietnam
e-mail: quyenkazan@gmail.com

V.N. To

Le Qui Don Technological University
Hanoi, Vietnam
e-mail: quyenkazan@gmail.com

V.K. Nguyen

Le Qui Don Technological University
Hanoi, Vietnam
e-mail: quyenkazan@gmail.com

T.S. Luong

Le Qui Don Technological University
Hanoi, Vietnam
e-mail: quyenkazan@gmail.com

T.Ph. Doan

Le Qui Don Technological University
Hanoi, Vietnam
e-mail: quyenkazan@gmail.com

M.T. Pham

Le Qui Don Technological University
Hanoi, Vietnam
e-mail: quyenkazan@gmail.com

T.T. Nguyen

Vietnam Academy of Science and Technology
Hanoi, Vietnam
e-mail: quyenkazan@gmail.com

Abstract. This paper presents the results of investigating the influence of fabrication and working conditions on the conductivity of solid electrolyte $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$. With the same material made from the starting precursors, the pellet pressure before sintering greatly affects the purity, as well as the conductivity of the electrolyte. With a pressing pressure of 8 tons/cm², the material has the highest conductivity in working conditions at room temperature, solid electrolyte $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ has the highest conductivity when working at 100 °C.

Keywords: sodium ion battery, solid electrolyte, $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$.

For citation: Q.Q. Ngo, V.N. Nguyen, V.N. To, V.K. Nguyen, T.S. Luong, T.Ph. Doan, M.T. Pham and T.T. Nguyen, “Production of solid electrolyte $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ for sodium-ion battery”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 16-29, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_16

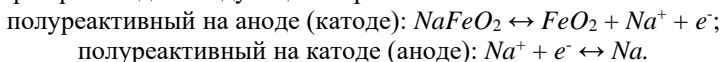
I. Введение

Спрос на компоненты для хранения энергии растет, что стимулирует рост числа исследований в области аккумуляторов. В последние годы вырос интерес к натрий-ионным аккумуляторам, которые в силу их низкой стоимости и высокой емкости заменяют литий-ионные аккумуляторы. Материал $\text{O}_3\text{-NaMnO}_2$, примененный в качестве катода для натрий-ионного аккумулятора, дает разрядную емкость 185 мАч/г при 0,1 С и сохраняет 71 % емкости после 20 циклов [1]; материал $\text{O}_3\text{-NaNi}_{1/3}\text{Fe}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ сохраняет 76 % емкости после 150 циклов [2].

Натрий-ионные батареи состоят из катода (соединения оксидов переходных металлов и натрия), анода (металлический натрий) и электролита. Помимо материала электродов, очень важную роль в рабочем процессе аккумуляторов играет электролит. В большинстве ионных аккумуляторов используются жидкие электролиты, обладающие преимуществом высокой проводимости. Однако при их зарядке существует потенциальный риск возгорания и взрыва. Альтернативой является использование твердых электролитов, полностью исключаящих опасность возгорания и взрыва.

В качестве твердых электролитов для натрий-ионных аккумуляторов используются такие материалы как Na_3PS_4 , $Na_2S-P_2S_5$ и $Na_2Se-Ga_2Se_3-GeSe_2$ [3-5]. Керамические электролиты, такие как $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$, $Na_{3+x}Sc_2Si_xP_{3-x}O_{12}$ и $Na_{1.3}Al_{0.3}Ti_{1.7}(PO_4)_3$ [6-9], также показали высокую стабильность при воздействии воздуха и низкой температуры, влаги [10]. Но низкая ионная проводимость и высокое электрическое сопротивление между электродом и границей электролита являются ограничением, которое необходимо преодолеть для продолжения исследований в данном направлении [11]. Кроме того, тот факт, что электролит проводит ионы при высоких температурах, также является препятствием для применения полностью твердотельных ионных аккумуляторов. В данной работе основное внимание сосредоточено на изучении влияния условий синтеза на свойства твердого электролита $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$, который может проводить ионы при комнатной температуре.

Механизм миграции ионов Na^+ в твердых неорганических электролитах показан на рис. 1 [12]. В частности, ионы Na^+ могут двигаться по трем механизмам: движение по границам зерен, перемещение за счет вытеснения ионов Na^+ , имеющихся в электролите, и, наконец, перемещение по отверстиям в твердом электролите. Химическая реакция в натрий-ионном аккумуляторе происходит следующим образом:



Поскольку Na и P могут испаряться в процессе синтеза при высоких температурах, ZrO_2 может оставаться на границе зерен, что препятствует переносу ионов Na^+ . Удаление примесей ZrO_2 при синтезе $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ можно осуществить путем оптимизации соотношения прекурсоров и поддержания температуры спекания на уровне 1100 °C в течение 18-ти часов. Однако даже при достижении синтезируемой фазы давление предварительного спекания по-прежнему оказывает большое влияние на ионную проводимость в твердом электролите. Исходя из этого, перед процессом спекания твердый электролит прессуют с различным давлением и измеряют электропроводность для оптимизации процесса изготовления электролитного материала для натрий-ионного аккумулятора [13].

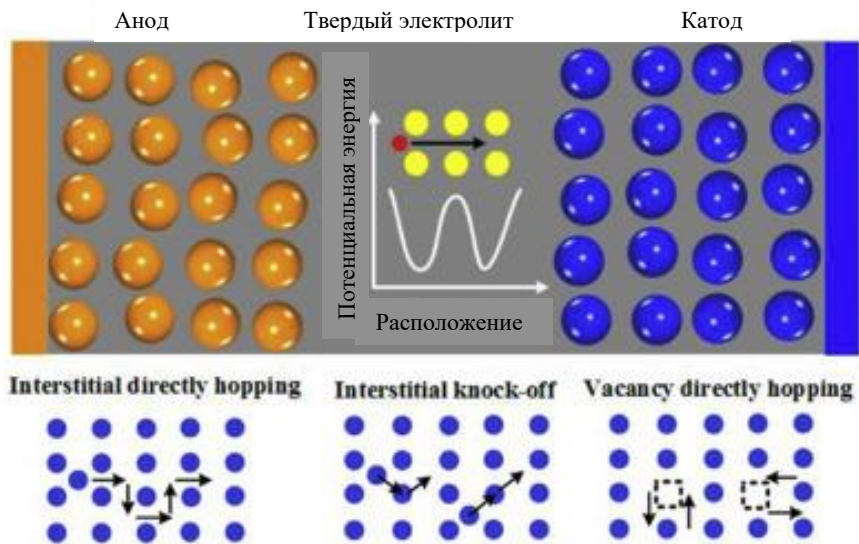


Рис. 1. Типы ионной диффузии в твердотельных неорганических электролитах

Fig. 1. Types of ionic diffusion in solid-state inorganic electrolytes

II. Экспериментальная часть

Материал $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ синтезировали методом твердофазной реакции из исходных материалов Na_2CO_3 , ZrO_2 , SiO_2 и $NH_4H_2PO_4$, которые растирались в течение 24 ч в этаноле. Перед обжигом исходные материалы сушили в печи при $155\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 12 ч с последующим отжигом при $900\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 12 ч. Затем порошок тщательно измельчали и прессовали в таблетки в форме дисков диаметром 15 мм и толщиной 1 мм перед нагреванием при $1100\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 18 ч для получения твердого электролита.

Проводимость таблеток $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ измеряли методом электрохимического импеданса (ЭИС). Блокирующие электроды изготавливаются путем нанесения серебра на обе стороны таблеток твердого электролита. Кристаллическую структуру материала определяли с помощью рентгеновской дифракции (XRD), морфологию поперечного сечения $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ наблюдали с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM).

Таблетка с твердым электролитом $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ была превращена в полностью твердотельную батарею CR2032 для исследования емкости и

цикла заряда-разряда. Для уменьшения внутреннего сопротивления при переходе ионов Na^+ через границу твердой фазы катод изготавливают путем измельчения смеси $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$, $NaFeO_2$, токопроводящий углеродный черный *Super P*, ацетиленовой сажи и нафiona в заданном соотношении с последующим покрытием одной стороны таблетки электролита.

III. Результаты и обсуждение

Результаты рентгеноструктурного анализа образцов, изготовленных при различных давлениях, показали, что дифракционные пики для всех образцов представляли собой характерные пики структуры типа *NASICON* (PDF №35-0412) (рис. 2).

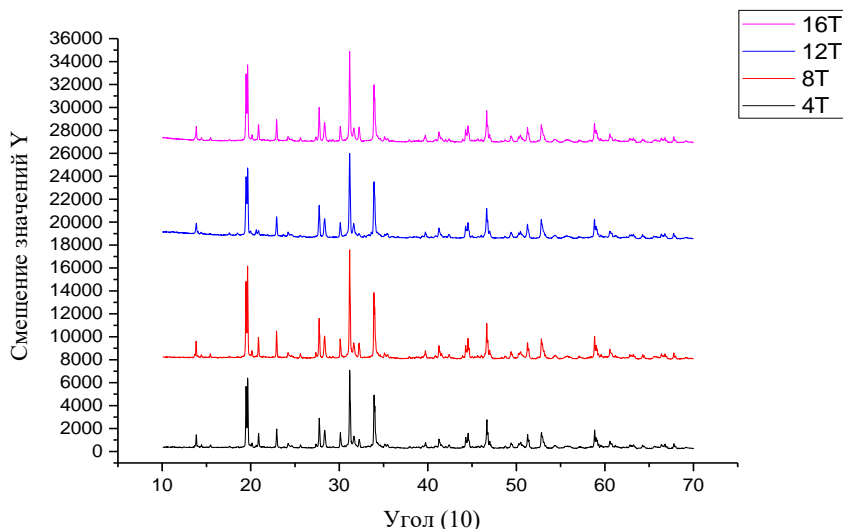


Рис. 2. Рентгенодифракционный спектр образцов $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ (Т – т/см²)

Fig. 2. X-ray diffraction spectrum of samples $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ (Т – t/cm²)

Все образцы, изготовленные при различных давлениях, показали относительно высокую чистоту с постоянными решетки $a = 15,657$, $b = 9,139$ и $c = 9,109$. Чистота материала сильно зависит от соотношения и легирования прекурсоров и особенно от температуры спекания. Фаза $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ образуется только при температурах выше 1100 °С. Примеси в продукте ограничивают добавлением Na_2CO_3 и $NH_4H_2PO_4$, которые выпаривают при высокой температуре [3]. Хотя чистота почти одинакова, проводимость между образцами значительно отличается от образования фазы $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$, которая в основном зависит от температуры спекания.

Электропроводность материалов определяли методом импедансной спектроскопии ЭИС. Влияние давления гранул на проводимость твердого электролита показано на рис. 3 (а). Диаграмма Найквиста показывает, что твердый электролит, изготовленный при давлении 8 т/см^2 , имеет наименьший радиус полуокружности, а это значит, что общее сопротивление зерен и сопротивление границ зерен материала малы. Так, твердый электролит, изготовленный при давлении 8 т/см^2 , имеет наилучшую ионную проводимость с проводимостью $1,72 \cdot 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$. Этот результат по сравнению с некоторыми электролитами в предыдущих исследованиях является вполне положительным (табл. 1). В последующих опытах приготовление электролита осуществлялось при этом давлении.

Таблица 1.
Электропроводность некоторых твердых электролитов

Table 1.
Electrical conductivity of some solid electrolytes

Твердый электролит	Проводимость, $\text{См} \cdot \text{см}^{-1}$	Источник
Na_3AlH_6	5×10^{-7}	[14]
Na_3PS_4	$\sim 10^{-4}$	[15]
<i>PEO-NASICON</i>	$4,4 \sim 6,0 \times 10^{-5}$	[15]
<i>PCL-PTMC:NaFSI</i>	10^{-5}	[16]
Na_3BS_3	$1,1 \times 10^{-5}$	[17]
$\text{Na}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$	10^{-5}	[18]
$\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$	$1,72 \times 10^{-4}$	в этом исследовании

В отличие от обычных жидких электролитов, проводимость твердых электролитов сильно зависит от температуры окружающей среды. Повышение температуры делает ионы более подвижными. Однако при высоких температурах узлы решетки будут сильно вибрировать, вызывая эффект торможения движения ионов и уменьшая проводимость. Результаты импедансной спектроскопии при различных температурах представлены на рис. 3(б). Видно, что при повышении температуры до 80 и $100 \text{ }^\circ\text{C}$. полуокружность практически исчезает. При температуре $200 \text{ }^\circ\text{C}$. радиус полуокружности быстро увеличивается, что объясняется колебаниями узлов решетки, препятствующих движению ионов Na^+ .

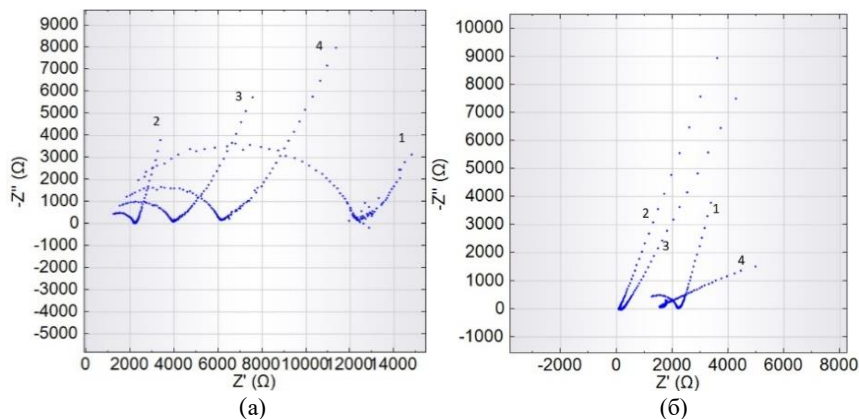
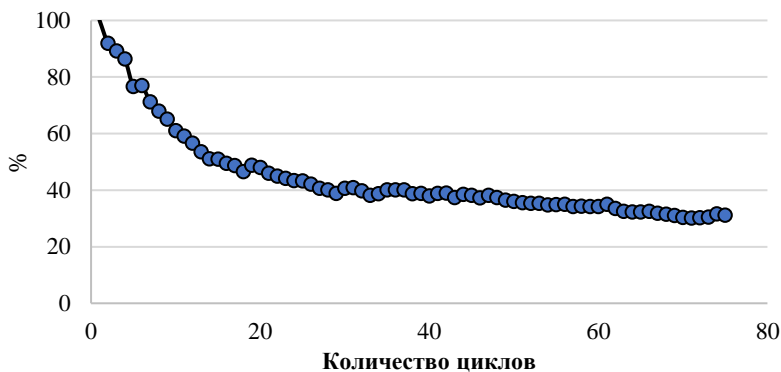
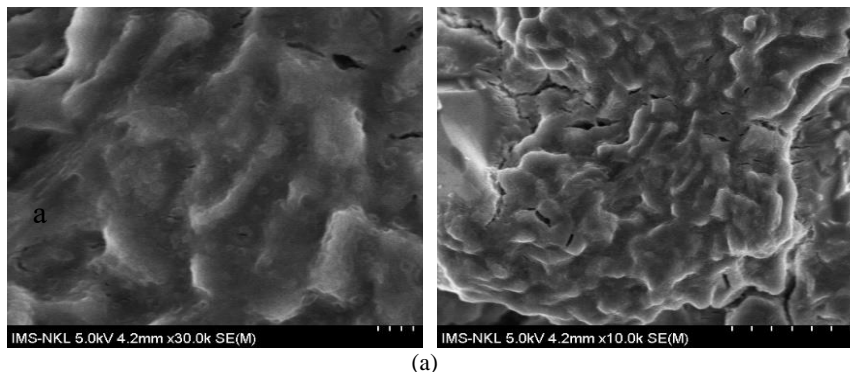


Рис. 3. Влияние давления на электропроводность материала (1 – 4 т/см², 2 – 8 т/см², 3 – 12 т/см², 4 – 16 т/см²) (а); влияние температуры на проводимость материала (1 – 25 °С, 2 – 80 °С, 3 – 100 °С, 4 – 200 °С) (б)

Fig. 3. Effect of pressure on the electrical conductivity of a material (1 – 4 t/cm², 2 – 8 t/cm², 3 – 12 t/cm², 4 – 16 t/cm²) (a); influence of temperature on material conductivity (1 – 25 °С, 2 – 80 °С, 3 – 100 °С, 4 – 200 °С) (b)

Полученное на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) изображение твердого электролита $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ после спекания при 1100 °С в течение 18 ч показано на рис. 4(а). Видно, что поперечное сечение имеет плотную бесшовную форму, с небольшими границами зерен, что позволяет ионам легко перемещаться в электролите. Хотя проводимость твердого электролита $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ достаточно высока при комнатной температуре, при работе в натрий-ионных батареях движение ионов через границу электрод-электролит затруднено. Это делает рабочую емкость батареи низкой, а способность к циклированию невысокой. Уменьшение внутреннего сопротивления может быть достигнуто за счет изготовления катода из $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$, материала анода – супер-П, ацетиленовой сажи и нафiona (нафионизация электрода). Результаты представлены на рис. 4(б), в первом цикле разрядная емкость аккумулятора довольно высокая (78 мАч/г), однако периодичность не стабильна, при этом емкость снижается на 50 % после 16 циклов заряда-разряда.



(б)

**Рис. 4. СЭМ-изображение электролита (а);
периодизация твердотельной натрий-ионной батареи (б)**

**Fig. 4. SEM image of the electrolyte (a);
periodization of a solid-state sodium-ion battery (b)**

Описанное выше явление можно объяснить тем, что, возможно, в первых циклах ион Na^+ покидает металлический Na -электрод и заполняет вакансии на катоде. Однако, поскольку сопротивление все еще велико, в следующих циклах при зарядке эти ионы не высвобождаются полностью, чтобы вернуться к аноду, что затрудняет быстрое снижение емкости. Однако эффективность разряда была значительно улучшена по сравнению с нанесением материала анода непосредственно на поверхность электролита без нафьюнизации (емкость всего 21 мАч/г, количество циклов разряда менее 10).

IV. Выводы

Твердый электролит из керамического материала $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ обладает хорошей ионной проводимостью даже при комнатной температуре с проводимостью $1,72 \cdot 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$. В процессе синтеза, помимо соотношения прекурсоров и температуры спекания, давление гранул также сильно влияет на ионную проводимость материала.

Результаты исследований показывают, что при давлении 8 т/см^2 продукт представляет собой таблетку твердого электролита бесшовного сечения с наименьшей границей зерен, создающую благоприятные условия для процесса ионной проводимости.

Твердый электролит $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ имеет хорошую проводимость при комнатной температуре до $100 \text{ }^\circ\text{C}$ и нестабилен при более высоких температурах. Процесс нафюнизации помогает полностью твердотельному аккумулятору достичь относительно высокой емкости (78 мАч/г).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Вьетнамского национального фонда развития науки и технологий (NAFOSTED), грант 15/2020/TN.

© Нго К.К., 2022

© Нгуен В.Н., 2022

© То В.Н., 2022

© Нгуен В.К., 2022

© Льюнг Ч.Ш., 2022

© Доан Т.Ф., 2022

© Фам М.Т., 2022

© Нгуен Т.Т., 2022

Поступила в редакцию 04.05.2022

Received 04.05.2022

Библиографический список

- [1] Zhang R., Lu Z., Yang Y., Shi W. First-principles investigation of the monoclinic NaMnO_2 cathode material for rechargeable Na-ion batteries // *Current Applied Physics*. 2018. Vol. 18. Is. 11. P. 1431-1435. DOI: 10.1016/j.cap.2018.08.011
- [2] Kim D., Lee E., Slater M., Lu W., Rood S., Johnson C.S. Layered $\text{Na}[\text{Ni}_{1/3}\text{Fe}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}]\text{O}_2$ cathodes for Na-ion battery application // *Electrochemistry Communications*. 2012. Vol. 18. P. 66-69. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.12.116
- [3] Ruana H., Guo F., Liu J., Song S., Jiang N., Cheng B. Optimization of $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ ceramic electrolyte and interface for high performance solid-state sodium battery // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45. Is. 2. Part A. P. 1770-1776. DOI: 10.1016/J.CERAMINT.2018.10.062

- [4] Hayashi A., Noi K., Sakuda A., Tatsumisago M. Superionic glass-ceramic electrolytes for room-temperature rechargeable sodium batteries // *Nature Communications*. 2012. Vol. 3. Art. no. 856. DOI: 10.1038/ncomms1843
- [5] Noi K., Hayashi A., Tatsumisago M. Structure and properties of the $\text{Na}_2\text{S-P}_2\text{S}_5$ glasses and glass-ceramics prepared by mechanical milling // *Journal of Power Sources*. 2014. Vol. 269. P. 260-265. DOI: 10.1016/J.JPOWSOUR.2014.06.158
- [6] Kim S.K., Mao A.W., Sen S., Kim S. Fast Na-Ion conduction in a chalcogenide glass-ceramic in the ternary system $\text{Na}_2\text{Se-Ga}_2\text{Se}_3\text{-GeSe}$ // *Chemistry of Materials*. 2014. Vol. 26. No. 19. P. 5695-5699. DOI: 10.1021/cm502542p
- [7] Noguchi Y., Kobayashi E., Plashnitsa L.S., Okada S., Yamaki J. Fabrication and performances of all solid-state symmetric sodium battery based on NASICON-related compounds // *Electrochimica Acta*. 2013. Vol. 101. P. 59-65. DOI: 10.1016/J.ELECTACTA.2012.11.038
- [8] Lalère F., Leriche J.B., Courty M., Boulineau S., Viallet V., Masquelier C., Seznec V. An all-solid state NASICON sodium battery operating at 200 °C // *Journal of Power Sources*. 2014. Vol. 247. P. 975-980. DOI: 10.1016/J.JPOWSOUR.2013.09.051
- [9] Guin M., Tietz F., Guillon O. New promising NASICON material as solid electrolyte for sodium-ion batteries: correlation between composition, crystal structure and ionic conductivity of $\text{Na}_{3+x}\text{Sc}_2\text{Si}_x\text{P}_{3-x}\text{O}_{12}$ // *Solid State Ionics*. 2016. Vol. 293. P. 18-26. DOI: 10.1016/J.SSI.2016.06.005
- [10] Khakpour Z. Influence of M: Ce^{4+} , Gd^{3+} and Yb^{3+} substituted $\text{Na}_{3+x}\text{Zr}_{2-x}\text{M}_x\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ solid NASICON electrolytes on sintering, microstructure and conductivity // *Electrochimica Acta*. 2016. Vol. 196. P. 337-347. DOI: 10.1016/J.ELECTACTA.2016.02.199
- [11] Zhang Z. et al. A self-forming composite electrolyte for solid-state sodium battery with ultralong cycle life // *Advanced Energy Materials*. 2016. Vol. 7. Is. 4. P. 160-196. DOI: 10.1002/aenm.201601196
- [12] Zhang B., Tan R., Yang L., Zheng J., Zhang K., Mo S., Lin Z., Pan F. Mechanisms and properties of ion-transport in inorganic solid electrolytes // *Energy Storage Materials*. 2018. Vol. 10. P. 139-159. DOI: 10.1016/J.ENSMS.2017.08.015
- [13] Fuentes R.O., Figueiredo F.M., Marques F.M.B., Franco J.L. Influence of microstructure on the electrical properties of NASICON materials // *Solid State Ionics*. 2001. Vol. 140. Is. 1-2. P. 173-179. DOI: 10.1016/S0167-2738(01)00701-9
- [14] Kim J., Yoon K., Park I., Kang K. Progress in the development of sodium-ion solid electrolytes // *Small Methods*. 2017. Vol. 1. Is. 10. P. 12. DOI: 10.1002/SMTD.201700219
- [15] Wang Y., Song S., Xu C., Hu N., Molenda J., Lu L. Development of solid-state electrolytes for sodium-ion battery - A short review // *Nano Materials Science*. 2019. Vol. 1. Is. 2. P. 91-100. DOI: 10.1016/J.NANOMS.2019.02.007
- [16] Sangeland C., Younesi R., Mindemark J., Brandell D. Towards room temperature operation of all-solid-state Na-ion batteries through polyester-polycarbonate-based polymer electrolytes // *Energy Storage Materials*. 2019. Vol. 19. P. 31-38. DOI: 10.1016/J.ENSMS.2019.03.022

- [17] Tsuji F., Nasu A., Hotehama C., Sakuda A., Tatsumisago M., Hayashi A. Preparation and characterization of sodium-ion conductive Na_3BS_3 glass and glass–ceramic electrolytes // *Materials Advanced*. 2021. Vol. 2. Is. 5. P. 1676-1682. DOI: 10.1039/D0MA00777C
- [18] Hayashi A., Masuzawa N., Yubuchi S., Tsuji F., Hotehama C., Sakuda A., Tatsumisago M. A sodium-ion sulfide solid electrolyte with unprecedented conductivity at room temperature// *Nature Communications*. 2019. Vol. 10. Art. no. 5266. DOI: 10.1038/s41467-019-13178-2

References

- [1] R. Zhang, Z. Lu, Y. Yang and W. Shi, “First-principles investigation of the monoclinic NaMnO_2 cathode material for rechargeable Na-ion batteries”, *Current Applied Physics*, vol. 18, is. 11, pp. 1431-1435, Nov. 2018. DOI: 10.1016/j.cap.2018.08.011
- [2] D. Kim, E. Lee, M. Slater, W. Lu, S. Rood and C.S. Johnson, “Layered $\text{Na}[\text{Ni}_{1/3}\text{Fe}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}]\text{O}_2$ cathodes for Na-ion battery application”, *Electrochemistry Communications*, vol. 18, pp. 66-69, 2012. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.12.116
- [3] Y. Ruana, F. Guo, J. Liu, S. Song, N. Jiang and B. Cheng, “Optimization of $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ ceramic electrolyte and interface for high performance solid-state sodium battery”, *Ceramics International*, vol. 45, is. 2, part A, pp.1770-1776, Feb. 2019. DOI: 10.1016/J.CERAMINT.2018.10.062
- [4] A. Hayashi, K. Noi, A. Sakuda and M. Tatsumisago, “Superionic glass-ceramic electrolytes for room-temperature rechargeable sodium batteries”, *Nature Communications*, vol. 3, art. no. 856, May 2012. DOI: 10.1038/ncomms1843
- [5] K. Noi, A. Hayashi and M. Tatsumisago, “Structure and properties of the $\text{Na}_2\text{S}-\text{P}_2\text{S}_5$ glasses and glass-ceramics prepared by mechanical milling”, *Journal of Power Sources*, vol. 269, pp. 260-265, Dec. 2014. DOI: 10.1016/J.JPOW-SOUR.2014.06.158
- [6] S.K. Kim, A.W. Mao, S. Sen and S. Kim, “Fast Na-Ion conduction in a chalcogenide glass-ceramic in the ternary system $\text{Na}_2\text{Se}-\text{Ga}_2\text{Se}_3-\text{GeSe}$ ”, *Chemistry of Materials*, vol. 236, no. 19, pp. 5695-5699, Sept. 2014. DOI: 10.1021/cm502542p
- [7] Y. Noguchi, E. Kobayashi, L.S. Plashnitsa, S. Okada and J. Yamaki, “Fabrication and performances of all solid-state symmetric sodium battery based on NASICON-related compounds”, *Electrochimica Acta*, vol. 101, pp. 59-65, July 2013. DOI: 10.1016/J.ELECTACTA.2012.11.038
- [8] F. Lalère, J.B. Leriche, M. Courty, S. Boulineau, V. Viallet, C. Masquelier and V. Seznec, “An all-solid state NASICON sodium battery operating at 200 °C”, *Journal of Power Sources*, vol. 247, pp. 975-980, Feb. 2014. DOI: 10.1016/J.JPOW-SOUR.2013.09.051
- [9] M. Guin, F. Tietz and O. Guillon, “New promising NASICON material as solid electrolyte for sodium-ion batteries: correlation between composition, crystal structure and ionic conductivity of $\text{Na}_{3+x}\text{Sc}_2\text{Si}_x\text{P}_{3-x}\text{O}_{12}$ ”, *Solid State Ionics*, vol. 293, pp. 18-26, Oct. 2016. DOI: 10.1016/J.SSI.2016.06.005

- [10] Z. Khakpour, "Influence of M: Ce⁴⁺, Gd³⁺ and Yb³⁺ substituted Na_{3+x}Zr_{2-x}M_xSi₂PO₁₂ solid NASICON electrolytes on sintering, microstructure and conductivity", *Electrochimica Acta*, vol. 196, pp. 337-347, Apr. 2016. DOI: 10.1016/J.RLECTACTA.2016.02.199
- [11] Z. Zhang et al., "A self-forming composite electrolyte for solid-state sodium battery with ultralong cycle life", *Advanced Energy Materials*, vol. 7, is. 4, pp. 160-196, Oct. 2016. DOI: 10.1002/aenm.201601196
- [12] B. Zhang, R. Tan, L. Yang, J. Zheng, K. Zhang, S. Mo, Z. Lin and F. Pan, "Mechanisms and properties of ion-transport in inorganic solid electrolytes", *Energy Storage Materials*, vol. 10, pp. 139-159, Jan. 2018. DOI: 10.1016/J.ENSM.2017.08.015
- [13] R.O. Fuentes, F.M. Figueiredo, F.M.B. Marques and J.I. Franco, "Influence of microstructure on the electrical properties of NASICON materials", *Solid State Ionics*, vol. 140, is. 1-2, pp. 173-179, March 2001. DOI: 10.1016/S0167-2738(01)00701-9
- [14] J. Kim, K. Yoon, I. Park and K. Kang, "Progress in the development of sodium-ion solid electrolytes", *Small Methods*, vol. 1, is. 10, pp. 12, Sept. 2017. DOI: 10.1002/SMTD.201700219
- [15] Y. Wang, S. Song, C. Xu, N. Hu, J. Molenda and L. Lu, "Development of solid-state electrolytes for sodium-ion battery - A short review", *Nano Materials Science*, vol. 1, is. 2, pp. 91-100, June 2019. DOI: 10.1016/J.NANOMS.2019.02.007
- [16] C. Sangeland, R. Younesi, J. Mindemark, and D. Brandell, "Towards room temperature operation of all-solid-state Na-ion batteries through polyester-polycarbonate-based polymer electrolytes", *Energy Storage Materials*, vol. 19, pp. 31-38, May 2019. DOI: 10.1016/J.ENSM.2019.03.022
- [17] F. Tsuji, A. Nasu, C. Hotehama, A. Sakuda, M. Tatsumisago and A. Hayashi, "Preparation and characterization of sodium-ion conductive Na₃BS₃ glass and glass-ceramic electrolytes", *Materials Advanced*, vol. 2, is. 5, pp. 1676-1682, Feb. 2021. DOI: 10.1039/D0MA00777C
- [18] A. Hayashi, N. Masuzawa, S. Yubuchi, F. Tsuji, C. Hotehama, A. Sakuda, M. Tatsumisago, "A sodium-ion sulfide solid electrolyte with unprecedented conductivity at room temperature", *Nature Communications*, vol. 10, art. no. 5266, Nov. 2019. DOI: 10.1038/s41467-019-13178-2

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Нго Куи Куен, кандидат технических наук, преподаватель Технологического университета им. Лэ Куи Дона, г. Ханой, Вьетнам.

Ван Нгйа Нгуен, кандидат химических наук, преподаватель Ханойского архитектурного университета, г. Ханой, Вьетнам.

Quy Q. Ngo, Cand. Sci. (Eng.), lecturer of the Le Qui Don Technological University, Hanoi, Vietnam.

Van N. Nguyen, Cand. Sci. (Chem.), lecturer of the Hanoi University of Architecture, Hanoi, Vietnam.

Ван Нгуен То, преподаватель Технологического университета им. Лэ Куи Дона, г. Ханой, Вьетнам.

Ван Ку Нгуен, преподаватель Технологического университета им. Лэ Куи Дона, г. Ханой, Вьетнам.

Чунг Шон Лыонг, преподаватель Технологического университета им. Лэ Куи Дона, г. Ханой, Вьетнам.

Тьен Фат Доан, преподаватель Технологического университета им. Лэ Куи Дона, г. Ханой, Вьетнам.

Мань Тхао Фам, кандидат химических наук, преподаватель Технологического университета им. Лэ Куи Дона, г. Ханой, Вьетнам.

Тьен Тхань Нгуен, преподаватель Вьетнамской Академии наук и технологий, г. Ханой, Вьетнам.

Van N. To, lecturer of the Le Qui Don Technological University, Hanoi, Vietnam.

Van K. Nguyen, lecturer of the Le Qui Don Technological University, Hanoi, Vietnam.

Trung S. Luong, lecturer of the Le Qui Don Technological University, Hanoi, Vietnam.

Tien Ph. Doan, lecturer of the Le Qui Don Technological University, Hanoi, Vietnam.

Manh T. Pham, Cand. Sci. (Chem.), lecturer of the Le Qui Don Technological University, Hanoi, Vietnam.

Tien T. Nguyen, lecturer of the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam.

УДК 621.3:537.8

DOI 10.46960/2658-6754_2022_2_30

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ВЕКТОРА ПОЙНТИНГА ЧЕРЕЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ. ЧАСТЬ 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА

Е.Н. Меньшов

Ульяновский государственный технический университет

Ульяновск, Россия

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

Представлена математическая модель вектора Пойнтинга вращающейся составляющей электромагнитной структуры, на основе которой построены модели плотности тока и магнитного момента. Источником магнитного момента является ток неизвестной физической природы, создаваемый циркуляцией постоянной составляющей потока электромагнитной мощности при наличии в системе электростатического потенциала.

Ключевые слова: векторный потенциал, вращающееся электромагнитное поле, классический радиус электрона, математическое моделирование электромагнитного поля, проекция магнитного момента, проекция момента импульса, электростатический потенциал.

Для цитирования: Меньшов Е.Н. Представление вектора Пойнтинга через электрические характеристики электротехнических систем. Часть 2. Моделирование плотности тока // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 2. С. 30-45. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_30

REPRESENTATION OF THE POYNTING VECTOR VIA ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF ELECTRICAL SYSTEMS. PART 2. SIMULATION OF CURRENT DENSITY

E.N. Menshov

Ulyanovsk State Technical University

Ulyanovsk, Russia

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

Abstract. A mathematical model of the Poynting vector of the rotating component of the electromagnetic structure is constructed, on the basis of which models of the current density and magnetic moment are constructed. The source of the magnetic moment is a current of unknown physical nature, created by the circulation of the constant component

of the electromagnetic power flow in the presence of an electrostatic potential in the system.

Key words: vector potential, rotating electromagnetic field, classical electron radius, electromagnetic field mathematical modeling, magnetic moment projection, angular momentum projection, electrostatic potential.

For citation: E.N. Menshov, “Representation of the Poynting vector via electrical characteristics of electrical systems. Part 2. Simulation of current density”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 30-45, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_30

I. Введение

Для анализа и моделирования электрических макро- и микросистем с распределенными параметрами в [1] предложена модифицированная формула вектора Пойнтинга, построенная на учете приложенного к системе напряжения U и вектора эквивалентной плотности тока \vec{J} , направление и локализация которого соответствует потоку вектора Пойнтинга. Этот подход требует уточнения в вопросе моделирования распределения эквивалентной плотности тока. В частности, эквивалентную плотность тока J можно вычислять по типовой формуле:

$$J = k_I \frac{I}{S(r)}, \quad (1)$$

где I – сила тока системы; $S(r)$ – площадь сечения формы потока мощности электромагнитного поля; k_I – коэффициент пропорциональности, вычисляемый по формуле баланса между потоком вектора плотности тока и током системы.

Ток системы является источников магнитного поля системы. Часть этого поля в области передачи потока электромагнитной энергии связана с эквивалентной плотностью тока. Такая связь обусловлена, например, формулой закона полного тока. Также полезность модифицированной формулы вектора Пойнтинга продемонстрирована в [1] на примере получения положительного решения фундаментальной задачи.

Целью настоящей работы является дальнейшее изучение фундаментальной основы модифицированной формулы вектора Пойнтинга в рамках расширения возможностей классической теории электромагнитного поля (ЭМП). В основу теоретической базы положен расчетный аппарат теоретической и физической электротехник.

II. Постановка задачи

В теории ЭМП используются два типа калибровочных соотношений для электродинамических потенциалов:

– калибровка Лоренца:

$$\operatorname{div}\vec{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial V}{\partial t} = 0; \quad (2)$$

– кулоновская калибровка:

$$\operatorname{div}\vec{A} = 0. \quad (3)$$

Традиционно считалось, что выбор типа калибровочных соотношений диктуется только удобством решаемой задачи [2], так как они приводят к одинаковым волновым уравнениям относительно силовых характеристик поля \vec{E} – вектора напряженности электрического поля и \vec{B} – вектора индукции магнитного поля.

Обратим внимание на то, что калибровка Лоренца (2) выражает нестационарное уравнение непрерывности векторного потенциала, а кулоновская калибровка (3) выражает стационарное уравнение непрерывности векторного потенциала [3]. Поэтому в первом случае волновые уравнения потенциалов наиболее удобны для описания волн, порождаемых нестационарными токами и зарядами.

Во втором случае система волновых уравнений удобна для описания волн, порождаемых стационарными токами и зарядами. Например, для вакуума эта система уравнения имеют традиционный вид:

$$\nabla^2 \vec{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \nabla \frac{\partial V}{\partial t}; \quad (4)$$

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0}. \quad (5)$$

Особенностью системы уравнений (4), (5) в том, что здесь скалярный потенциал V определяется мгновенным распределением зарядов так, как будто они покоятся [4]. Мгновенное распределение зарядов непрерывно изменяется во времени $\rho = \rho(t)$. Учитывая, что напряженность электрического поля связана со скалярным потенциалом $\vec{E}_k = -\nabla V$, то второе слагаемое в правой части (4) становится током смещения кулоновского поля:

$$\frac{1}{\mu_0 c^2} \nabla \frac{\partial V}{\partial t} = - \frac{1}{\mu_0 c^2} \frac{\partial \vec{E}_k}{\partial t} = - \vec{J}_k. \quad (6)$$

Обратимся к фундаментальному стационарному процессу – орбитальному перемещению заряда (электрона) в центрально симметричном поле (протона). Для такой задачи в [5] разработан нетрадиционный метод решения (4).

Суть метода в том, что составляющие левой и правой частей (4) усредняются за время T_0 периода орбитального вращения электрона. Вычислением установлено, что усредненные за период движения заряда по замкнутой произвольной стационарной орбите электронный ток и ток смещения кулоновского поля взаимно компенсируются. Поэтому волновое уравнение (4) относительно усредненной за период вращения проекции векторного потенциала на нормаль к неподвижной полуплоскости становится однородным (принуждающая составляющая в правой части дифференциального уравнения (ДУ) становится равной нулю):

$$\nabla^2 \langle A_n \rangle_{T_0} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \langle A_n \rangle_{T_0}}{\partial t^2} = 0, \quad (7)$$

где $\langle A_n \rangle_{T_0}$ – усредненная за период T_0 вращения электрона проекция векторного потенциала на нормаль к неподвижной полуплоскости, перпендикулярной к плоскости орбиты.

Однородное волновое уравнение (7) описывает стационарный (в соответствии с исходными условиями задачи) свободный процесс с собственной частотой колебания ω_c , которая физически связана с частотой ω_0 вращения электрона ($\omega_c = \eta \omega_0(r)$). Решение ДУ (7) определялось в комплексной форме:

$$\langle \dot{A}_n \rangle_{T_0} = \dot{A}_{0n}(\vec{r}) e^{j\omega_c t}. \quad (8)$$

При этом (7) для усредненного стационарного процесса примет вид уравнения Гельмгольца:

$$\nabla^2 \dot{A}_{0n}(\vec{r}) + \frac{\omega_c^2}{c^2} \dot{A}_{0n}(\vec{r}) = 0. \quad (9)$$

Такое уравнение в центрально-симметричном поле допускает решение, подобное решению стационарного уравнения Шредингера для атома водорода [5]:

$$\dot{A}_{0n}(\vec{r}) = R(r)\dot{Y}(\theta, \varphi). \quad (10)$$

где $R(r)$ – радиальная функция; $\dot{Y}(\theta, \varphi) = P(\theta)\dot{\Phi}(\varphi)$ – сферическая функция; $P(\theta)$ – присоединенные функции Лежандра [6-7].

Комплексная функция $\dot{\Phi}(\varphi) = C_{0n}e^{j(m\varphi + \varphi_{0n})}$ с постоянной интегрирования $\dot{C}_{0n} = C_{0n}e^{j\varphi_{0n}}$ есть комплексная форма общего решения ДУ:

$$\frac{d^2\Phi}{d\varphi^2} + m^2\Phi = 0,$$

где с учетом требования однозначности функции $\Phi(\varphi)$ значение m должно быть целым натуральным числом ($0, \pm 1, \pm 2, \dots$) и в квантовой механике называется магнитным квантовым числом.

Таким образом, (8) с учетом (9) в сферической системе координат примет вид:

$$\langle \dot{A}_n \rangle_{r_0} = C_{0n}R(r)P(\theta)e^{j(m\varphi + \omega_{ck}t + \varphi_{0n})}. \quad (11)$$

где ω_{ck} – квантованные значения частот колебаний векторного потенциала.

Выводы

1. В [5] показано, что классическое приближение разрешает движение электрона в центрально-симметричном силовом поле по дискретным орбитам.

2. Согласно [8, с. 13], кулоновская калибровка порождает поперечные моды векторного потенциала.

3. Выражение (11) описывает вращающую полевую структуру векторного потенциала (стационарную замкнутую волну). Угловая скорость вращения замкнутой волны вокруг оси z : $d\varphi/dt = -\omega_{ck}/m$.

4. Ток смещения (6) обусловлен потенциальным кулоновским полем, его $\text{rot}\vec{J}_k = 0$, поэтому этот ток не может создавать магнитный момент.

Таким образом, вращающая полевая структура векторного потенциала может порождать замкнутую электромагнитную волну, которая будет

создавать циркуляцию потока вектора Пойнтинга. В соответствии с раскрытой в [1] формулой с циркулирующим потоком вектора Пойнтинга связан некоторый ток, который может порождать магнитный момент.

Поэтому непосредственной задачей данной работы является моделирование и исследование тока, связанного с вектором Пойнтинга.

III. Восстановление составляющих векторного потенциала \vec{A}

В декартовой системе координат вектор \vec{A} и его проекция на единичный направляющий вектор \vec{e}_n примут соответствующий вид:

$$\begin{aligned}\vec{A} &= A_x \vec{e}_x + A_y \vec{e}_y + A_z \vec{e}_z = \vec{A}_{xy} + A_z \vec{e}; \\ (\vec{A} \vec{e}_n) &= (\vec{A}_{xy} \vec{e}_n) = A_x \alpha_n + A_y \beta_n,\end{aligned}\quad (12)$$

где $\vec{e}_n = \alpha_n \vec{e}_x + \beta_n \vec{e}_y$ – нормальный вектор к фиксированной неподвижной плоскости S , проходящей через ось орбиты Oz . Применяя в (11) обозначение $\Psi = m\varphi + \omega_{ck}t$ и подставляя в (12), получим:

$$\left\langle \dot{\vec{A}} \vec{e}_n \right\rangle_{T_0} = \langle A_n \rangle_{T_0} = C_{0n} A_m(r, \theta) e^{j(\Psi + \varphi_{0n})} = \alpha_n \langle \dot{A}_x \rangle_{T_0} + \beta_n \langle \dot{A}_y \rangle_{T_0}. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (9) (аналогично как в [5] при $t = 0$), получим при фиксированном, но произвольном векторе \vec{e}_n два независимых уравнения Гельмгольца:

$$\begin{aligned}\nabla^2 \dot{A}_{0x}(\vec{r}) + \frac{\omega_c^2}{c^2} \dot{A}_{0x}(\vec{r}) &= 0; \\ \nabla^2 \dot{A}_{0y}(\vec{r}) + \frac{\omega_c^2}{c^2} \dot{A}_{0y}(\vec{r}) &= 0.\end{aligned}\quad (14)$$

Выражения решений ДУ (14) аналогичны выражению (10):

$$\begin{aligned}\dot{A}_{0x}(\vec{r}) &= C_x R(r) P(\theta) e^{j(m\varphi + \varphi_x)}; \\ \dot{A}_{0y}(\vec{r}) &= C_y R(r) P(\theta) e^{j(m\varphi + \varphi_y)},\end{aligned}\quad (15)$$

где $\dot{C}_x = C_x e^{j\varphi_x}$ и $\dot{C}_y = C_y e^{j\varphi_y}$ – постоянные интегрирования.

Для согласования постоянных интегрирования представим ДУ (14) в виде двух систем ДУ первых порядков:

$$\frac{d\dot{A}_{0y}}{d\varphi} = -m\dot{A}_{0x}; \frac{d\dot{A}_{0x}}{d\varphi} = m\dot{A}_{0y}; \quad (16)$$

$$\frac{d\dot{A}_{0y}}{d\varphi} = m\dot{A}_{0x}; \frac{d\dot{A}_{0x}}{d\varphi} = -m\dot{A}_{0y}. \quad (17)$$

Системе (16) соответствуют условия: $C_x = C_y = C_0$; $\varphi_y = \varphi_x + 90^\circ$, а системе (17) – условия:

$$C_x = C_y = C_0; \varphi_y = \varphi_x - 90^\circ. \quad (18)$$

Так как угловая скорость вращения замкнутой волны вокруг оси z отрицательная ($-\omega_{ck}/m$), то вращение направлено в противоположную сторону координате φ , т.е. по часовой стрелке. Поэтому выбираем условия (18), и (15) примут вид:

$$\langle \dot{A}_x \rangle_{T_0} = Y_0 e^{j(\psi + \varphi_x)}; \langle \dot{A}_y \rangle_{T_0} = Y_0 e^{j(\psi + \varphi_x - 90^\circ)}, \quad (19)$$

в которых использованы следующие обозначения:

$$Y_0 = C_0 R(r) P(\theta); \psi = m\varphi + \omega_{ck} t. \quad (20)$$

На основе (19) при соответствующих ортах \vec{e}_x и \vec{e}_y декартовых координат запишем вращающийся параллельно плоскости орбиты вектор:

$$\langle \dot{\vec{A}}_{xy} \rangle_{T_0} = \vec{e}_x Y_0 e^{j(\psi + \varphi_x)} + \vec{e}_y Y_0 e^{j(\psi + \varphi_x - 90^\circ)}. \quad (21)$$

Применяя классическую формулу $Re\dot{A} = 0,5(\dot{A} + \dot{A}^*)$, запишем вращающийся вектор $\langle \vec{A}_{xy} \rangle_{T_0}$ (21) в вещественной форме:

$$\langle \vec{A}_{xy} \rangle_{T_0} = Y_0 \{ \vec{e}_x \cos(\psi + \varphi_x) + \vec{e}_y \sin(\psi + \varphi_x) \}. \quad (22)$$

IV. Определение вектора Пойнтинга

Выразим вектор Пойнтинга через векторный потенциал ЭМП [4].

Запишем в комплексно-сопряженной форме полный векторный потенциал $\langle \dot{\vec{A}} \rangle_{T_0} = \dot{\vec{A}}_m e^{j\omega_{ck}t}$, $\langle \dot{\vec{A}}^* \rangle_{T_0} = \dot{\vec{A}}_m^* e^{-j\omega_{ck}t}$, то будем иметь:

$$\begin{aligned} \langle \dot{\vec{E}} \rangle_{T_0} &= -j\omega_{ck} \langle \dot{\vec{A}} \rangle_{T_0}, & \langle \dot{\vec{E}}^* \rangle_{T_0} &= j\omega_{ck} \langle \dot{\vec{A}}^* \rangle_{T_0}; \\ \langle \dot{\vec{H}} \rangle_{T_0} &= \frac{1}{\mu_0} \left[\nabla \langle \dot{\vec{A}} \rangle_{T_0} \right]; & \langle \dot{\vec{H}}^* \rangle_{T_0} &= \frac{1}{\mu_0} \left[\nabla \langle \dot{\vec{A}}^* \rangle_{T_0} \right]. \end{aligned}$$

Учитывая кулоновскую калибровку (3), вычислим выражения:

$$\begin{aligned} \langle \dot{\vec{\Pi}}_1 \rangle_{T_0} &= \left[\langle \dot{\vec{E}} \rangle_{T_0} \langle \dot{\vec{H}}^* \rangle_{T_0} \right] = -\frac{j\omega_{ck}}{\mu_0} \left\{ \nabla \left(\langle \dot{\vec{A}} \rangle_{T_0} \langle \dot{\vec{A}}^* \rangle_{T_0} \right) \right\}; \\ \langle \dot{\vec{\Pi}}_2 \rangle_{T_0} &= \left[\langle \dot{\vec{E}}^* \rangle_{T_0} \langle \dot{\vec{H}} \rangle_{T_0} \right] = \frac{j\omega_{ck}}{\mu_0} \left\{ \nabla \left(\langle \dot{\vec{A}}^* \rangle_{T_0} \langle \dot{\vec{A}} \rangle_{T_0} \right) \right\}. \end{aligned}$$

Значение постоянной составляющей вектора Пойнтинга вращающегося ЭМП определим по типовой формуле [9]:

$$\langle \vec{\Pi}_0 \rangle_{T_0} = 0,25 \left\{ \langle \dot{\vec{\Pi}}_1 \rangle_{T_0} + \langle \dot{\vec{\Pi}}_2 \rangle_{T_0} \right\} = 0.$$

Таким образом, орбитальное ЭМП не излучает энергию.

Определим силовые характеристики вращающегося ЭМП.

Взяв производную по времени от составляющей векторного потенциала (22), получим выражение напряженности электрического поля:

$$\langle \vec{E}_{xy} \rangle_{T_0} = -\omega_{ck} Y_0 \left\{ -\vec{e}_x \sin(\psi + \varphi_x) + \vec{e}_y \cos(\psi + \varphi_x) \right\}. \quad (23)$$

При этом индукция магнитного поля $\langle \vec{B}_{xy} \rangle_{T_0} = \text{rot} \langle \dot{\vec{A}}_{xy} \rangle_{T_0}$ в декартовой системе координат будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \langle \vec{B}_{xy} \rangle_{T_0} &= \begin{bmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ Y_0 \cos(\psi + \varphi_x) & Y_0 \sin(\psi + \varphi_x) & 0 \end{bmatrix} = \\ &= \left[-\vec{e}_x \sin(\psi + \varphi_x) + \vec{e}_y \cos(\psi + \varphi_x) \right] \frac{\partial Y_0}{\partial z} + \left[\sin(\psi + \varphi_x) \frac{\partial Y_0}{\partial x} - \cos(\psi + \varphi_x) \frac{\partial Y_0}{\partial y} \right] + \end{aligned}$$

$$+ Y_0 \left\{ \frac{\partial \sin(\psi + \varphi_x)}{\partial x} - \frac{\partial \cos(\psi + \varphi_x)}{\partial y} \right\} \vec{e}_z.$$

Учтя производные от переменных сферической системы координат:

$$\frac{\partial r}{\partial x} = \cos\varphi \sin\theta; \frac{\partial r}{\partial y} = \sin\varphi \sin\theta; \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\cos\varphi \cos\theta}{r}; \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\sin\varphi \cos\theta}{r}; \quad (24)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\frac{\sin\varphi}{r \sin\theta}; \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \frac{\cos\varphi}{r \sin\theta}; \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \quad (25)$$

получим [8]:

$$\begin{aligned} \langle \vec{B}_{xy} \rangle_{T_0} = & - \left[\vec{e}_x \sin(\psi + \varphi_x) - \vec{e}_y \cos(\psi + \varphi_x) \right] \left(\frac{\partial Y_0}{\partial r} \cos\theta - \frac{\partial Y_0}{r \partial r} \sin\theta \right) + \\ & + \vec{e}_z \left[\frac{\partial Y_0}{\partial r} \sin\theta + \frac{\partial Y_0}{r \partial \theta} \cos\theta + \frac{m Y_0}{r \sin\theta} \right] \sin(\psi - \varphi + \varphi_x). \end{aligned} \quad (26)$$

Используя выражения (23) и (26), получим вектор Пойнтинга вращающейся составляющей ЭМП:

$$\begin{aligned} \langle \vec{\Pi}_{xy} \rangle_{T_0} = & -\frac{1}{\mu_0} \left[\frac{\partial \langle \vec{A}_{xy} \rangle_{T_0}}{\partial t} \left[\nabla \langle \vec{A}_{xy} \rangle_{T_0} \right] \right] = -\frac{\omega_{ck} Y_0}{\mu_0} \times \\ & \times \begin{bmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ -\sin(\psi + \varphi_x) & \cos(\psi + \varphi_x) & 0 \\ -\frac{\partial Y_0}{\partial z} \sin(\psi + \varphi_x) & \frac{\partial Y_0}{\partial z} \cos(\psi + \varphi_x) & \Lambda \sin(\psi - \varphi + \varphi_x) \end{bmatrix} = \\ & = -\frac{\omega_{ck} Y_0}{\mu_0} \Lambda \vec{e}_\psi \sin(\psi - \varphi + \varphi_x); \end{aligned} \quad (27)$$

$$\Lambda = \left[\frac{\partial Y_0}{\partial r} \sin\theta + \frac{\partial Y_0}{r \partial \theta} \cos\theta + \frac{m Y_0}{r \sin\theta} \right]; \quad (28)$$

$$\vec{e}_\psi = \left[\vec{e}_x \cos(\psi + \varphi_x) + \vec{e}_y \sin(\psi + \varphi_x) \right]. \quad (29)$$

Определим постоянную составляющую вектора Пойнтинга циркулирующей составляющей электромагнитного поля (21):

$$\begin{aligned} \langle \vec{\Pi}_{xy^0} \rangle_{T_0} &= \frac{j\omega_{ck}}{4\mu_0} \left\{ \left[\left\langle \dot{\vec{A}}_{xy}^* \right\rangle_{T_0} \left[\nabla \left\langle \dot{\vec{A}}_{xy} \right\rangle_{T_0} \right] \right] - \left[\left\langle \dot{\vec{A}}_{xy} \right\rangle_{T_0} \left[\nabla \left\langle \dot{\vec{A}}_{xy}^* \right\rangle_{T_0} \right] \right] \right\} = \\ &= \frac{j\omega_{ck}}{4\mu_0} \left\{ \left\langle \dot{\vec{A}}_{xy}^* \right\rangle_{T_0} \nabla \left\langle \dot{\vec{A}}_{xy} \right\rangle_{T_0} - \left\langle \dot{\vec{A}}_{xy} \right\rangle_{T_0} \nabla \left\langle \dot{\vec{A}}_{xy}^* \right\rangle_{T_0} \right\} = \end{aligned} \quad (30)$$

$$= -\frac{\omega_{ck} Y_0}{2\mu_0} \left[\vec{e}_x \left(Y_0 \frac{\partial \Psi}{\partial x} + \frac{\partial Y_0}{\partial y} \right) + \vec{e}_y \left(Y_0 \frac{\partial \Psi}{\partial y} + \frac{\partial Y_0}{\partial x} \right) \right] = -\frac{\omega_{ck} Y_0}{2\mu_0} \vec{\eta};$$

$$\vec{\eta} = \left(\frac{\partial Y_0}{\partial r} \sin\theta + \frac{\partial Y_0}{r \partial \theta} \cos\theta + \frac{m Y_0}{r \sin\theta} \right) (-\vec{e}_x \sin\theta + \vec{e}_y \cos\theta) = \Lambda \vec{e}_\varphi, \quad (31)$$

где \vec{e}_φ – азимутальный орт сферической и цилиндрической систем координат.

Таким образом, векторные линии постоянной составляющей вектора Пойнтинга совпадают с азимутальными координатными линиями, поэтому они замкнуты, и они охватывают ось z .

V. Моделирование эквивалентной плотности тока

Здесь решим обратную задачу – определим эквивалентную плотность тока неизвестной физической природы через постоянную составляющую вектора Пойнтинга (30) – (31):

$$\vec{J}_{\Pi 0} = \left\langle \vec{\Pi}_{xy^0} \right\rangle_{T_0} U_0^{-1}, \quad (32)$$

где $U_0 = V_3 - V(\infty) = V_3$ постоянное напряжение на поверхности микросистемы, равное некоторому эквивалентному потенциалу V_3 , который не известен.

Учтем то, что поток вектора плотности тока (как и вектора Пойнтинга) циркулирует вокруг оси z . Это свойство позволяет обратиться к его магнитному моменту, обладающему физическим смыслом.

Причиной орбитального магнитного момента в рамках традиционных классических представлений является зарядовый ток, а в квантовой механике – это особый ток – ток плотности вероятности. При этом вращение заряда по орбите создает магнитный момент кратностью единицы, а ток плотности вероятности обуславливает магнитный момент кратностью m [6, с. 175-177].

Вектора плотностей тока (32) $\vec{J}_{\Pi_0} = -J_{\Pi_0} \vec{e}_\varphi$ лежат в плоскостях, параллельных плоскости xOy , поэтому направление создаваемого магнитного момента совпадает с осью z .

Вычислим магнитный момент, создаваемый непрерывно распределенной плотностью тока по методике, излагаемой в учебной литературе по квантовой механике [6, с. 176]. Пусть через элемент площади ds_φ , нормальный азимутальной координатной линии φ , протекает элемент тока $dI = J_{\Pi_0} ds_\varphi$, создающий элемент магнитного момента $dM_{\Pi z} = dIS$, где $S = \pi r^2 \sin^2 \theta$, $ds_\varphi = r dr d\theta$. Подставив (30) в (32), получим элемент магнитного момента $dM_{\Pi z}$ и результирующую проекцию магнитного момента $M_{\Pi z}$ на ось z соответственно:

$$dM_{\Pi z} = -\vec{e}_z \frac{\pi \omega_{ck}}{2\mu_0 V_3} Y_0 \Lambda r^3 \sin^2 \theta dr d\theta;$$

$$\vec{M}_{\Pi z} = -\vec{e}_z \frac{\pi \omega_{ck}}{2\mu_0 V_3} \int_0^\infty r^3 dr \int_0^\pi Y_0 \Lambda \sin^2 \theta d\theta. \quad (33)$$

Подставляя (28) в (33), учитывая (20) и разбивая (33) на слагаемые, при этом обозначив $\cos \theta = \xi$, $\sigma = 2rZ/nr_B$, где Ze – заряд ядра, r_B – радиус Бора [6, с. 138], получим:

$$\vec{M}_{\Pi z} = -\vec{e}_z \frac{\pi \omega_{ck} C_0^2}{2\mu_0 V_3} (M_{\Pi 1} + M_{\Pi 2} + M_{\Pi 3});$$

$$M_{\Pi 1} = m \int_0^\infty R^2(r) r^2 dr \int_0^\pi P^2 \sin^2 \theta d\theta = m \int_0^\infty R^2(r) r^2 dr \int_{-1}^1 P^2(\xi) d\xi;$$

$$M_{\Pi 2} = \int_0^\infty R \frac{dR}{dr} r^3 dr \int_0^\pi P^2 \sin^3 \theta d\theta = -\frac{3}{2} \int_0^\infty R^2 r^2 dr \int_{-1}^1 P^2 (1 - \xi^2) d\xi;$$

$$M_{\Pi 3} = \int_0^\infty R^2 r^2 dr \int_0^\pi P \frac{dP}{d\theta} \cos \theta \sin^2 \theta d\theta = \frac{1}{2} \int_0^\infty R^2 r^2 dr \int_{-1}^1 P^2 (1 - 3\xi^2) d\xi; \quad (34)$$

$$M_{\Pi 1} + M_{\Pi 2} + M_{\Pi 3} = (m-1) \left(\frac{nr_B}{2Z} \right)^3 \int_0^\infty R^2 \sigma^2 d\sigma \int_{-1}^1 P^2(\xi) d\xi;$$

$$\vec{M}_{\Pi z} = -\vec{e}_z (m-1) C_0^2 \frac{\pi \omega_{ck}}{2\mu_0 V_3} \left(\frac{nr_B}{2Z} \right)^3 \int_0^\infty R^2 \sigma^2 d\sigma \int_{-1}^1 P^2(\xi) d\xi.$$

Заметим, что направление магнитного момента $\vec{M}_{\Pi z}$ связано с направлением тока правилом правого винта, а направление тока, согласно (32),

определяется направлением вектора Пойнтинга $\langle \vec{\Pi}_{xy0} \rangle_{T_0}$, поэтому $\vec{M}_{\Pi z} = M_{\Pi z} \vec{e}_z$. Его источником является вращающаяся составляющая ЭМП, поэтому назовем его полевым магнитным моментом.

Из (34) следует, что полевая составляющая магнитного момента на ось z имеет кратность $(m-1)$. Результирующий магнитный момент $\vec{M}_{\Pi z}$ состоит из полевого магнитного момента и магнитного момента движения заряженной частицы, которой в квантово-механическом представлении представляется через магнетон Бора $\mu_B (-\mu_B \vec{e}_z)$ [6, с. 177]. При этом значение результирующего магнитного момента должно соответствовать научно-обоснованному значению, равному $\mu_B m$:

$$\vec{M}_z = \vec{M}_{\Pi z} - \mu_B \vec{e}_z = -m \mu_B \vec{e}_z.$$

Это возможно при условии соответствия в (34) постоянной интегрирования C_0^2 следующему выражению:

$$C_0^2 = 2\mu_B V_3 \left[\frac{\pi \omega_{ck}}{\mu_0} \left(\frac{n r_B}{2Z} \right)^3 \int_0^\infty R^2 \sigma^2 d\sigma \int_{-1}^1 P^2(\xi) d\xi \right]^{-1}. \quad (35)$$

Таким образом, подставив (35) в (30), (32) и (34), получим математические модели вектора Пойнтинга, плотности тока и магнитного момента.

VI. Определение электростатического потенциала системы

Вспользуемся механическими свойствами электромагнитного поля, характеристиками которых являются вектор плотности импульса $\vec{g} = c^{-2} \vec{\Pi}$ и плотность момента импульса $\vec{k}_0 = [\vec{r} \vec{g}]$ [2]. Вычислим момент количества движения $\vec{L}_{\Pi z}$ вращающейся полевой структуры, используя типовую формулу и сферическую систему координат:

$$\vec{L}_{\Pi z} = \frac{1}{c^2} \iiint_V [\vec{r} \times \langle \vec{\Pi}_{xy} \rangle_{T_0}] dV = \frac{1}{c^2} \iiint_V [\vec{e}_r \times \vec{e}_\psi] \langle \Pi_{xy} \rangle_{T_0} r^3 dr \sin\theta d\theta d\varphi.$$

Подставив в последнюю формулу (27), получим:

$$\vec{L}_{\Pi z} = -\frac{\omega_{ck}}{\mu_0 c^2} \int_0^\infty r^3 dr \int_0^\pi Y_0 \Lambda \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} [\vec{e}_r \times \vec{e}_\psi] \sin(\psi - \varphi + \varphi_x) d\varphi. \quad (36)$$

Вычисляя векторное произведение единичных направляющих векторов:

$$\begin{aligned} [\vec{e}_r \times \vec{e}_\psi] &= \begin{bmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \cos\varphi \sin\theta & \sin\varphi \sin\theta & \cos\theta \\ \cos(\psi + \varphi_x) & \sin(\psi + \varphi_x) & 0 \end{bmatrix} = \\ &= -\vec{e}_x \cos\theta \sin(\psi + \varphi_x) + \vec{e}_y \cos\theta \cos(\psi + \varphi_x) + \vec{e}_z \sin\theta \sin(\psi - \varphi + \varphi_x), \end{aligned}$$

и учитывая ненулевой интеграл по азимутальной переменной φ на интервале 2π от гармонических тригонометрических функций, получим:

$$\begin{aligned} \vec{L}_{\text{Пз}} &= -\vec{e}_z \frac{\omega_{\text{св}}}{\mu_0 c^2} \int_0^\infty r^3 dr \int_0^\pi Y_0 \Lambda \sin^2 \theta d\theta \int_0^{2\pi} \sin^2(\psi - \varphi + \varphi_x) d\varphi = \\ &= -\vec{e}_z \frac{\pi \omega_{\text{св}}}{\mu_0 c^2} \int_0^\infty r^3 dr \int_0^\pi Y_0 \Lambda \sin^2 \theta d\theta. \end{aligned} \quad (37)$$

Сопоставляя (37) и (33), получим:

$$\vec{M}_{\text{Пз}} = \frac{c^2}{2V_3} \vec{L}_{\text{Пз}}. \quad (38)$$

Подчиняя (38) гиромагнитному отношению $e/2m_e$ (e , m_e – заряд и масса покоя электрона соответственно) [6, с. 177], получим известное выражение $m_e c^2 = eV_3$, вытекающее из предположения, что полная энергия точечного покоящегося электрона обусловлена энергией его электростатического поля [2, 4]. Из этого положения следует известный классический радиус электрона $r_0 = e^2/4\pi\epsilon_0 m_e c^2$. Поэтому V_3 есть электростатический потенциал $V_3(r_0)$, создаваемый точечным зарядом электрона на удалении от точечного заряда на расстоянии классического радиуса электрона.

VIII. Обсуждение результатов

Эквивалентному току, определяемому из вектора Пойнтинга по (32), соответствует квантованный магнитный момент (34) кратности $(m-1)$, который корректно дополняет однократный магнитный момент классического тока орбитального электрона до научно обоснованного в квантовой механике орбитального магнитного момента электрона кратности m (где m – магнитное квантовое число). Поэтому, согласованность полевой и зарядовой составляющих квантово-механическому результату подтверждает корректность примененного классического подхода.

В настоящее время не существует физической основы для тока (32), который создавал бы квантованный магнитный момент кратности $(m-1)$. Однако этот ток, как и ток перемещения заряда электрона, создает магнитный момент, который является научно-обоснованной физической реальностью. Этот ток обусловлен циркуляцией постоянной составляющей потока электромагнитной мощности, причиной которого выступает вектор Пойнтинга вращающейся вокруг оси z электромагнитной полевой структуры.

Из (38) с учетом (37) и (35) следует, что вращающаяся вокруг оси z составляющая ЭМП создает квантованный момент количества движения кратности $m-1$ ($\vec{L}_{\Pi z} = -(m-1)\hbar\vec{e}_z$), который также корректно дополняет однократный момент импульса орбитальной частицы (электрона), равный $-\hbar\vec{e}_z$, до наблюдаемого значения. Результирующий орбитальный момент количества движения (вдоль оси вращения – оси z) корректно согласуется с научно-обоснованным в квантовой механике значением момента импульса:

$$\vec{L}_z = \vec{L}_{\Pi z} - \hbar\vec{e}_z = -m\hbar\vec{e}_z, \quad (39)$$

где \hbar – постоянная Планка.

Требование соответствия (38) фундаментальному гиромагнитному отношению приводит к другой фундаментальной величине – к классическому радиусу электрона r_0 . В [1] аналогичный результат повторялся для задачи с равномерно движущимся электроном.

Именно электростатический потенциал $V_s(r_0)$ при наличии циркулирующего потока электромагнитной мощности становится необходимым условием появления квантованного магнитного момента, который рассчитывается посредством выявленного тока.

VIII. Заключение

1. В макросистемах, предназначенных для однонаправленной передачи потока электромагнитной энергии (от источника к потребителю), не создается магнитного момента. В формуле вектора Пойнтинга для таких систем плотность тока выполняет расчетную роль.

2. В рамках классической теории разработана математическая модель плотности тока и связанного с ним магнитного момента для орбитального электрона в центрально симметричном электростатическом поле.

3. Для автономных электромагнитных микросистем с постоянной составляющей циркулирующего вектора Пойнтинга, возникает неизвестный тип тока, который является причиной квантованного магнитного момента.

4. Источником неизвестного типа тока является циркулирующий поток электромагнитной мощности при наличии электростатического потенциала (электрического заряда).

Таким образом, построена математическая модель вектора Пойнтинга вращающейся составляющей электромагнитной структуры, на основе которой построены модели плотности тока и магнитного момента. Источником магнитного момента является неизвестной физической природы ток, создаваемый циркуляцией постоянной составляющей потока электромагнитной мощности при наличии в системе электростатического потенциала.

© Меньшов Е.Н., 2022

Поступила в редакцию 13.04.2022

Received 13.04.2022

Библиографический список

- [1] Меньшов Е.Н. Представление вектора Пойнтинга через электрические характеристики электротехнических систем // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 4 (16). С. 36-46. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_36
- [2] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Теория поля. Том 2. М.: Физматлит, 2003. – 536 с.
- [3] Меньшов Е.Н. О свойствах калибровки Лоренца в теории электромагнитного поля // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей. 2020. Вып. 16. С. 97-104.
- [4] Джексон Дж. Классическая электродинамика. М.: Мир, 1965. – 702 с.
- [5] Меньшов Е.Н. Расширение возможностей классической теории электромагнитного поля // Научное обозрение. Физико-математические науки. 2020. № 1. С. 4-4. DOI: 10.17513/srpm.92
- [6] Матвеев А.Н. Квантовая механика и строение атома. М.: Высшая школа, 1965. – 355 с.
- [7] Никифоров А.Ф., Уваров В.Б. Специальные функции математической физики. М.: Наука, 1978. – 320 с.
- [8] Ильинский Ю.А., Келдыш Л.В. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом. М.: МГУ, 1989. – 299 с.
- [9] Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука, 1967. – 780 с.

References

- [1] E.N. Menshov, “Representation of the Poynting vector through electrical characteristics of electrical systems”, *Smart Electrical Engineering*, vol. 16, no. 4, pp. 36-46, Dec. 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_36 (in Russian).
- [2] L.D. Landau and E.M. Lifshits, *Teoreticheskaya fizika. Teoriya polya [Theoretical Physic. Field Theory]*. Vol. 2. Moscow: Fizmatlit, 2003 (in Russian).
- [3] E.N. Menshov, “O svojstvah kalibrovki Lorenca v teorii elektromagnitnogo polya [On the properties of Lorentz calibration in electromagnetic field theory]”, in proc. *Sintez, analiz i diagnostika elektronnyh cepej [Synthesis, analysis and diagnostics of electronic circuits]*, is. 16, pp. 97-104, 2020 (in Russian).

- [4] J. Jackson, *Klassicheskaya elektrodinamika [Classical electrodynamics]*. Moscow: Mir, 1965 (in Russian).
- [5] E.N. Menshov, “Rasshirenie vozmozhnostej klassicheskoy teorii elektromagnitnogo polya [Expanding the possibilities of the classical theory of the electromagnetic field]”, *Nauchnoe obozrenie. Fiziko-matematicheskie nauki [Scientific Review. Physical and mathematical sciences]*, no. 1, pp. 4-4, 2020 (in Russian). DOI: 10.17513/srpm.92
- [6] A.N. Matveev, *Kvantovaya mekhanika i stroenie atoma [Quantum mechanics and the structure of the atom]*. Moscow: Higher School, 1965 (in Russian).
- [7] A.F. Nikiforov and V.B. Uvarov, *Special'nye funkicii matematicheskoy fiziki [Special functions of mathematical physics]*. Moscow: Nauka, 1978 (in Russian).
- [8] Yu.A. Ilyinsky and L.V. Keldysh, “Vzaimodejstvie elektromagnitnogo izlucheniya s veshchestvom” [Interaction of electromagnetic radiation with matter]. Moscow: MGU, 1989 (in Russian).
- [9] A. Ango, “Matematika dlya elektro- i radioinzhenerov” [Mathematics for electrical and radio engineers]. Moscow: Nauka, 1967 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Меньшов Евгений Николаевич, доктор технических наук, доцент Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Российская Федерация.

Eugene N. Menshov, D. Sci (Eng.), associate professor of Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation.

ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВРАЩЕНИЙ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫХ СТРУКТУРАХ И НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ

В.И. Лившиц

ЗАО «Особое конструкторское бюро
систем автоматизированного проектирования»

Москва, Россия

e-mail: vl@okbsapr.ru

Выдвинута и обоснована гипотеза, согласно которой в распределенных индуктивно-емкостных структурах при протекании быстропеременных токов, в особенности сверхвысокой частоты (СВЧ), и при наличии соответствующих степеней свободы, происходит преобразование импульса и энергии электромагнитного поля в механические импульс и энергию, проявляющееся как два вида вращений по двум взаимосвязанным физическим механизмам, имеющим в своей основе известные физические явления. Для первого вида – относительно слабого вращения структуры в целом (в режиме движителя) – электрическая конвекция, а для второго вида – относительно сильного вращения выделенной из структуры части (в режиме двигателя) – униполярная индукция. Данные эффекты, с одной стороны, логически следуют из законов электродинамики, с другой стороны – неожиданны, поскольку принято считать, что ни электрическая конвекция, ни униполярная индукция к технике переменных токов (тем более, к СВЧ-энергетике) отношения не имеют. Представлены аргументы против данной концепции, обоснована необходимость расширенного понимания этих явлений. Открытие указанных эффектов, условием которого является их экспериментальное подтверждение, может инициировать цепную реакцию научно-технического прогресса, став в итоге революционным. Поскольку СВЧ-энергетика позволяет сконцентрировать в минимальном объеме не только максимальную энергию, но и максимальный импульс электромагнитного поля, для электромеханики это будет означать возможность создания не только электроприводов с беспрецедентно высоким уровнем удельных энергетических показателей, но и новой продукции: движителей для космической техники, по внешним признакам – безопорных, но основанных на импульсе, циркулирующем внутри электромагнитного поля. В настоящей работе детально проработаны и представлены концептуальные решения данных промышленных продуктов.

Ключевые слова: инверторный электропривод, распределенная индуктивно-емкостная структура, СВЧ-энергетика, униполярная индукция, униполярный электродвигатель переменного тока, электромагнитный движитель, электромеханическое преобразование энергии, электрическая конвекция.

Для цитирования: Лившиц, В.И. Открытие электромагнитных вращений в распределенных индуктивно-емкостных структурах и новое направление в электротехнике // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 2. С. 46-79.
DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_46

A DISCOVERY OF ELECTROMAGNETIC ROTATIONS IN DISTRIBUTED INDUCTIVE-CAPACITIVE STRUCTURES AND THE NEW DIRECTION IN ELECTROMECHANICS

V.I. Livshits

OKB SAPR JSC

Moscow, Russia

e-mail: vl@okbsapr.ru

Abstract. A hypothesis has been put forward and substantiated, according to which in distributed inductive-capacitive structures during the flow of fast-changing currents, in particular, microwave, and in the presence of appropriate degrees of freedom, the momentum and energy of the electromagnetic field are converted into mechanical momentum and energy, manifested as two types of rotations according to two interrelated physical mechanisms, which are based on known physical phenomena. Namely, for the first type – a relatively weak rotation of the structure as a whole (in the propulsion mode) – electrical convection, and for the second type – a relatively strong rotation of the part isolated from the structure (in the engine mode) – unipolar induction. Thus, these effects, on the one hand, logically following from the laws of electrodynamics, on the other hand, are unexpected: after all, it is believed that neither electrical convection nor unipolar induction have anything to do with the technology of alternating currents – especially, with microwave energy. Convincing arguments have been made that this is not the case, and the understanding of these phenomena needs to be expanded. It is all the more likely that if the discovery of these effects, the condition of which is experimental confirmation, takes place, then it will be revolutionary and initiate a chain reaction of scientific and technological progress. Since microwave energy makes it possible to concentrate in a minimum volume not only the maximum energy, but also the maximum pulse of the electromagnetic field, for electromechanics this will mean the possibility of creating not only electric drives with an unprecedentedly high level of specific energy indicators, but also new products: propulsion for space technology, by external signs - unsupported, but based on the pulse circulating inside the electromagnetic field. Conceptual solutions of such industrial products are worked out in detail and presented.

Key words: distributed inductive-capacitive structure, electromechanical energy conversion, electromagnetic propulsion, electric convection, unipolar induction, unipolar AC motor, inverter electric drive, microwave power engineering.

For citation: V.I. Livshits, “A discovery of electromagnetic rotations in distributed inductive-capacitive structures and the new direction in electromechanics”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 46-79, 2022.
DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_46

I. Введение

Интерес к электрической конвекции, активно изучавшейся в конце XIX – начале XX вв., в настоящее время почти полностью утрачен. В современной литературе при рассмотрении движения заряженных тел данное явление практически никогда не выделяют в отдельную физическую категорию. Это очевидно, например, при сравнении двух учебных пособий с одинаковым названием «Электричество», но изданных в разные годы: А. Эйхенвальда [1] и С. Калашникова [2]. В соответствующем разделе второго приведены те же иллюстрации, что и в первом, но совпадающие по смыслу тексты отличаются тем, что в них ни электрическая конвекция как таковая, ни токи конвекции не упоминаются. На понимании того, что движущиеся заряды независимо от их природы возбуждают магнитное поле, это не сказывается. Однако как быть, если требуется описать процессы во вращающейся обмотке распределенной LC -структуры, в которой концентрация свободных электронов – благодаря тому, что она является еще и электродом конденсатора – величина переменная, способная в обе стороны отличаться от равновесной, соответствующей электронеутральности?

Приведенный пример показывает, что движущееся тело для возбуждения магнитного поля не обязательно должно нести заряд постоянной величины и знака, что по умолчанию подразумевается в определении токов конвекции и считается достаточным: ведь ранее явление электрической конвекции изучалось лишь с целью экспериментального подтверждения факта возникновения магнитного поля при движении наэлектризованного тела. Согласно статье проф. А. Афанасьева (1878-1940) из энциклопедии Брокгауза и Ефрона [3], единственное, что для этого требовалось – привести в движение наэлектризованное тело и зарегистрировать его магнитное действие. Это и было успешно осуществлено Роуландом в 1876 г., а затем многократно перепроверено другими учеными. Наиболее информативными считаются опыты А. Эйхенвальда, подтвердившие также магнитное действие токов смещения, вопрос о существовании которых неразрывно связан с первым. Но лишь в одном из этих опытов, поставленном Кремье по предложению Пуанкаре в 1900 г. и затем успешно повторенном Пендером, вместо прямого – магнитного действия (отклонение магнитной стрелки) токов конвекции, изучалось их индукционное действие (возбуждение электрического тока), естественно, согласно закону электромагнитной индукции, при их изменении. Изменение токов конвекции осуществлялось ступенчато: включением/выключением, причем возбуждение тока изучалось не в том же

проводнике, который являлся подвижным наэлектризованным телом, что, в принципе, было бы не менее естественным, а в близко расположенном.

В дальнейшем это направление не получило развития: по-видимому, не только вследствие того, что задача исследований была решена, но и в связи с отсутствием в то время технических средств, позволяющих, усовершенствовав методику, расширить ее постановку. Между тем, интересно было бы изучить и обратную возможность: не переменным током конвекции возбуждать ток проводимости, а изменяющимся током проводимости возбуждать ток конвекции, приводя тем самым наэлектризованное тело в движение. Поскольку электрическое поле, возникающее при изменении тока проводимости, является вихревым, не имеющим начала и конца, то такое движение выглядело бы «безопорным», противореча закону сохранения момента импульса, однако отрицательный ответ на возможность его существования поставил бы под сомнение законы электродинамики. Налицо явный парадокс, каждый из которых, как известно, бывает в физике только кажущимся. Однако сведений о натуральных экспериментах, поставленных для его разрешения, нет. Считается, что они и не требуются: достаточно мысленного эксперимента с интерпретацией его результатов, предложенной лауреатом Нобелевской премии Р. Фейнманом [4] (рис. 1).

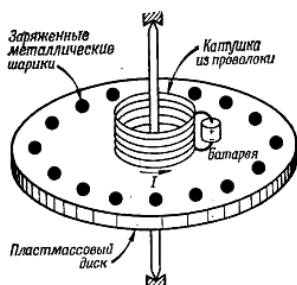


Рис. 1. Кажущийся электродинамический парадокс [4, рис. 17.5]

Fig. 1. Apparent electrodynamic paradox [4, fig. 17.5]

Неподвижный диск с заряженными шариками после разрыва цепи обмотки должен – будто бы в нарушение закона сохранения момента импульса – начать вращаться вследствие попадания шариков в вихревое электрическое поле с концентрическими силовыми линиями, образующееся при прекращении тока. Очевидно, что это и будет случай возбуждения тока конвекции изменяющимся током проводимости. При этом Р. Фейнман не отрицает, что так и произойдет, и приводит эту модель для иллюстрации того, что законы сохранения в электродинамике действуют в системе «вещество

+ поле», а только для вещества или только для поля они могут не выполняться. Очевидно также, что эта модель унаследовала от описанного выше опыта Кремье-Пендера все присущие ему искусственные ограничения: наэлектризованное тело (шарики) несет постоянный заряд; изменение первичного тока (проводимости) ступенчатое, а возбуждение вторичного тока (конвекции) регистрируется не в носителе первичного тока (обмотке), а в отдалении, причем, судя по рис. 1, весьма значительном. Тот факт, что ток проводимости в принципе способен возбуждать ток конвекции, описанная модель доказывает. Но о каких практических применениях этого эффекта может идти речь, если возбуждаемый ток представляет собой не вращение, а краткий одиночный импульс, причем весьма слабый?

Заменим теперь систему «электронейтральная обмотка + заряженные шарики» распределенной LC -структурой, упомянутой еще выше. Ее пример показывает, что принимаемое по умолчанию понимание электрической конвекции как результат движения тел, несущих постоянный заряд, неполно, поскольку магнитное поле способно возбуждаться и движением тел, несущих осциллирующие по величине и знаку заряды, каковыми являются, в частности, обмотки распределенной LC -структуры (в теории электромагнитного поля под осциллирующим зарядом принято понимать заряд, совершающий осциллирующее движение; далее в тексте это уточнение опущено). Из этого следует, что их равномерное вращение тоже соответствует переменному току конвекции, который в известных опытах получался путем изменения скорости вращения постоянных зарядов. Это понимание, по видимому, является новым, иначе трудно объяснить, почему подобные эффекты не были предсказаны ранее. С учетом же того, что обмоткам распределенной LC -структуры присуще, наряду с емкостным, и индуктивное действие, причем наиболее сильное по отношению к самим себе (т.н. самоиндукция), становится очевидным, что для возбуждения в них токов конвекции (т.е. приведения во вращение) нет необходимости привлекать сторонние обмотки: значительно эффективнее это могут сделать токи проводимости, циркулирующие по ним же. Поэтому, определив переменный ток конвекции через равномерное движение осциллирующего заряда, резонно определить и две индуктивно связанные токовые моды – кондукционную (электрический ток) и конвекционную (механическое вращение) – способные сосуществовать в одной вращающейся обмотке и взаимно обмениваться энергией.

Во вращающейся обмотке возможна и третья токовая мода – инерционная – обусловленная тем, что свободные электроны обладают инертной массой (т.н. эффект Толмена-Стюарта). Однако в установившихся режимах вращения (при отсутствии углового ускорения) условий для ее проявления нет.

Следовательно, неисследованные в этом аспекте распределенные LC -структуры имеют огромный потенциал, заключающийся, по меньшей мере, в реальной возможности создания нового вида продукции – движителей вращения на новом для электромеханики физическом принципе: электрической конвекции в ее расширенном понимании. Это представляется убедительной причиной для того, чтобы «реабилитировать» это явление как отдельную физическую категорию и вновь вернуться к его исследованию уже на новом научно-техническом уровне.

II. Электромагнитные движители на принципе электрической конвекции и их физическая модель

С примером конкретного исполнения такого движителя можно ознакомиться в [5], содержащем ссылки на выложенные на сайте Роспатента заявки на изобретения, поэтому детально описывать его конструкцию и принцип действия нет смысла. Целесообразно рассмотреть новую концепцию – последовательного возбуждения – позволяющую не только радикально его упростить, но и построить наглядную физическую модель, на которой можно будет провести эксперименты, логическим продолжением поставленных более века назад хрестоматийные опыты А. Эйхенвальда.

Согласно [5], для внесения в обмотку распределенной LC -структуры заряда, осциллирующего синхронно с осцилляциями протекающего тока, необходим источник ЭДС, сторонний по отношению к токообразующему. Поскольку распределенная LC -структура содержит, по меньшей мере, две обмотки, то такой вариант независимого возбуждения при всей широте возможностей, сложен в реализации, поскольку требует питания от трех гальванически развязанных синхронизированных источников: двух намагничивающих и одного заряжающего.

Далее, удалось установить, что аналогичный результат может быть достигнут значительно проще и не менее эффективно. Этому способствовали конструктивные замечания, высказанные проф. В.Я. Гечей (НИИЭМ) при обсуждении данного варианта, в результате чего было предложено последовательное возбуждение, целесообразное для моторных применений. Оно обеспечивается подключением к двум обмоткам одного источника питания (токообразующего и заряжающего одновременно) – так, чтобы его ЭДС была приложена непараллельно токам, протекающим через обмотки. Продольная составляющая ЭДС обеспечивает прохождение тока по обмотке, а поперечная составляющая ее же, частично отклоняя поток свободных электронов в сторону и связывая их электрическим полем, заряжает обмотку. Перпендикулярность, предельный случай непараллельности, получается при включении обмоток асимметрично: через внешние выводы обмоток извне и распределенную емкость между обмотками изнутри LC -

структуры. Внутренние выводы обмоток свободны. В этом случае уменьшающиеся, благодаря боковым ответвлениям, вплоть до нуля на подходе к свободным внутренним выводам, токи через обмотки продвигаются электрическим полем, перпендикулярным обмоткам. Асимметричное подключение возможно по двум вариантам: 1) при расположении подключенных и свободных выводов разных обмоток на одних краях; 2) при расположении на каждом из краев подключенного вывода одной обмотки и свободного вывода другой.

С другой стороны, очевидно, что даже в витках обычных соленоидов при высокочастотном (ВЧ) питании не может быть строгой параллельности между током и ЭДС, поскольку существуют межвитковые и межслойные емкости, превращающие их по существу в распределенные LC -структуры. Поэтому не исключено, что и у них тоже должна быть тенденция к вращению, но, вероятнее всего, настолько слабая, что экспериментально ее зарегистрировать проблематично.

Физическая модель электромагнитного движителя на описанном принципе, позволяющая воспроизвести и экспериментально изучить первый вид электромагнитных вращений в распределенных LC -структурах, изображена на рис. 2, а ее укрупненный сегмент – на рис. 3. Поскольку предстоит регистрация весьма слабых вращающих моментов, модель помещена под прозрачный колпак, защищающий от движений окружающего воздуха, а ее движущаяся часть – каретка – подвешена на одной игольчатой опоре, расположенной выше центра тяжести. Сверху закреплены балансировочные грузики, регулировкой положения которых можно устранить биения каретки при ее вращении. Собственно движитель – распределенная LC -структура – представляет собой максимально отдаленный от оси восьмигранный обод, окружающий каретку. Между внутренней обмоткой 1 и внешней обмоткой 2 в виде зеркально симметричных спиралей помещен активный диэлектрик в виде основных брусков 3 призматического поперечного сечения, выполненных из материала, целесообразно – с повышенными значениями диэлектрической и/или магнитной проницаемостей (ϵ , μ), например, из феррита.

С внешней и внутренней сторон обмоток к ним примыкают вспомогательные бруски 4 и 5 из того же материала, назначение которых – замыкание внешних ветвей магнитных потоков, образуемых обмотками при пропускании тока. Их толщина выбрана меньше толщины брусков 3, поскольку по брускам 4 и 5 проходят лишь части магнитного потока, проходящего по брускам 3. Сверху внутри LC -структуры закреплен отбортованный несущий диск 6, а снаружи ее боковая поверхность стянута витым бандажом 7, обеспечивающим жесткость конструкции.

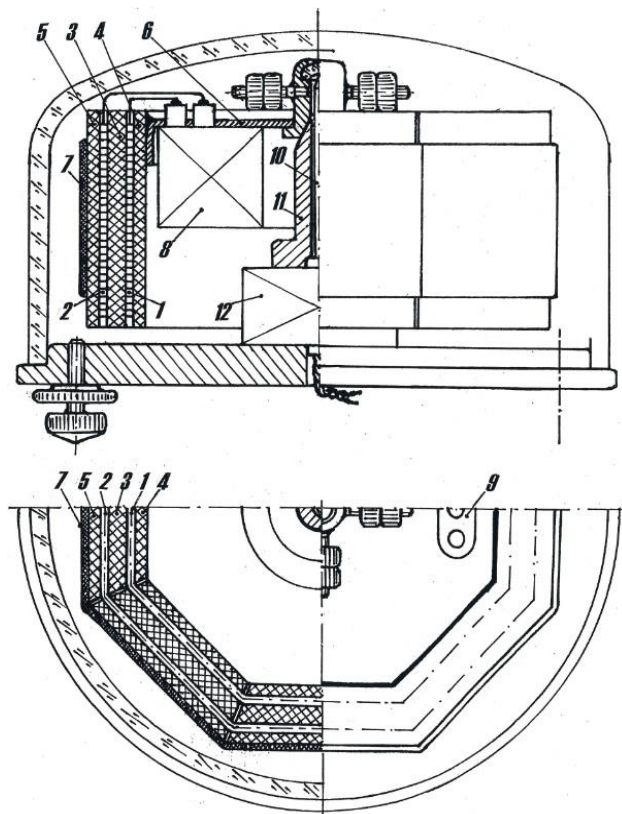


Рис. 2. Физическая модель электромагнитного движителя

Fig. 2. Physical model of the electromagnetic propulsion

Под несущим диском по центру закреплен кольцеобразный блок ВЧ генератора 8 с автономным источником питания, подключенный к обмоткам по первому из вышеуказанных вариантов – к двум обмоткам с одного (верхнего) края, а нижние точки обмоток свободны. Целесообразно, чтобы генератор обеспечивал резонансный режим работы распределенной LC -структуры, для чего последняя должна служить частотоподающим элементом его схемы. Генератор управляется через оптический порт 9, содержащий приемный фотодиод и индикаторный светодиод, отображающий состояние генератора. Направляя на него, без снятия колпака, инфракрасный пульт дистанционного управления (например, от TV), генератором можно управлять, не оказывая на каретку механического воздействия.

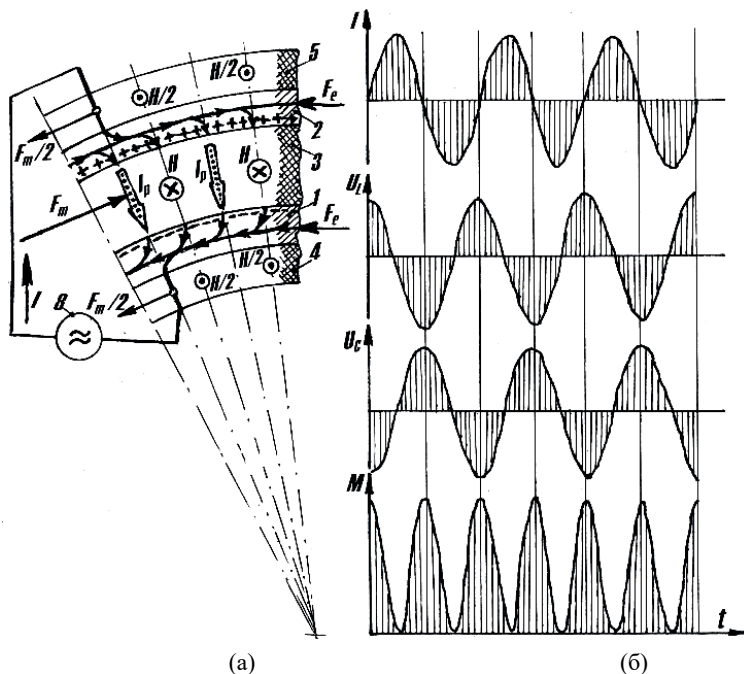


Рис. 3. Сегмент физической модели электромагнитного движителя (а) и физический принцип образования вращающего момента электрической природы (б)

Fig. 3. The segment of physical model of the electromagnetic propulsion (a) and the physical principle of the generation of the torque of an electric nature (b)

Опорная игла 10 каретки пропущена через центральное отверстие в стойке 11, установленной на блоке электромагнитного арретира и вибратора 12, провода управления которым выведены наружу. При арретировании опорная игла опускается вниз, благодаря чему каретка плотно сопрягается по коническим поверхностям со стойкой и выравнивается. Вибрированием поднятой иглы можно свести трение в опоре к нулю, если вибрация будет такой, что амплитудное значение ускорения превысит ускорение свободного падения. Левитирующий режим каретки позволяет смоделировать работу движителя в космических условиях, для которых он предназначен. Следует учитывать, что электромагнитный поворот каретки будет проявляться на фоне углового смещения неподвижных частей модели под действием суточного вращения Земли, подобно маятнику Фуко.

Прохождение тока через обмотки происходит вследствие перезаряда распределенной емкости между обмотками, а значит, накопления в обмотках связанных зарядов, попадающих в то же самое вихревое электрическое поле, что и свободные заряды рис. 3(а). В то же время силы, действующие на связанные заряды обмоток со стороны первичного (токообразующего) поля, привязаны к их выводам, они являются внутренними и не могут противодействовать внешним силам со стороны вихревого поля, обладающего собственным импульсом. Поскольку и напряженность вихревого поля (пропорциональная ЭДС самоиндукции U_L), и связанный заряд (пропорциональный напряжению между обмотками U_C), в свою очередь, пропорциональны по модулю производной по времени от протекающего тока I , они оказываются осциллирующими в противофазе, обеспечивая возможность индуцирования конвекционной токовой моды кондукционной формированием сил электрической природы F_e .

Непрерывность вращения распределенной LC -структуры достигается тем же путем, что и у якоря коллекторного двигателя, питаемого переменным током: неизменностью результатов силового взаимодействия при синхронном изменении знаков обоих сомножителей, определяющих силы. Во втором случае это магнитодвижущие силы якоря и индуктора (природа движущих сил – магнитная), здесь же это связанные заряды обмоток и воздействующие на них вихревые поля (природа движущих сил – электрическая). Поскольку для разных обмоток противоположны знаки обоих сомножителей, их вращающие моменты одинаковы. В итоге суммарный момент M пульсирует с двойной частотой тока I и имеет огибающую, функции $y = \sin^2 x$, причем его пики приходятся на моменты прохождения тока через ноль, т.е. когда и связанные заряды обмоток, и напряженности вихревых полей достигают амплитудных значений (рис. 3, б).

Амплитудные значения токов, протекающих при работе ВЧ генератора через обмотки распределенной LC -структуры, в отличие от обмоток обычных соленоидов, непостоянны по длинам проводов, а изменяются от максимума в начальных участках до нуля в конечных. Однако, в связи с постоянством направления протекания, это обстоятельство сказывается на их индуктивном действии лишь количественно, ослабляя его, приблизительно, вдвое. Это может быть скомпенсировано уплотнением укладки проводов по мере приближения к концам – тем более что уменьшение там плотности тока позволяет уменьшить и их сечения. Но технологически это выполнимо лишь на печатных обмотках, рассматриваемых ниже.

Принципиальным является вопрос выбора оптимальной величины зазора между обмотками, задаваемого толщиной основных брусков из активного диэлектрика, с учетом значений ϵ и μ их материала – так, чтобы

связанные заряды каждой из обмоток попадали бы, в основном, в собственные вихревые поля, а не во встречно направленные поля смежных обмоток. Этот параметр оптимизируем, поскольку при крайних его значениях движитель теряет работоспособность: при чрезмерно малых – вследствие взаимоничтожения вихревых полей обмоток, а при чрезмерно больших – вследствие малости величин их зарядов.

Активный диэлектрик целесообразно выбирать с повышенными значениями как μ , так и ϵ для того, чтобы он успешно работал не только в качестве магнитного экрана, но и активной среды конденсатора. Наиболее рациональным выбором для первых опытов является ВЧ феррит, оптимальный же вариант – относительно новые материалы – мультиферроики, сочетающие свойства ферромагнетиков и сегнетоэлектриков: очень большие значения как μ , так и ϵ [6].

Таковы процессы, имеющие в своей основе электрическую конвекцию, протекающие внутри обмоток и обеспечивающие относительно слабое (в связи с электрической природой), но не требующее вещественной опоры, вращение распределенной LC -структуры как одного целого – в режиме движителя. Вращающие моменты, которые представляется возможным получить таким путем, при всей их малости, выглядят все же соизмеримыми с теми, которые обеспечивает одна из наиболее простых, экономичных, и надежных систем ориентации искусственных спутников Земли (ИСЗ) на орбите – созданием управляющих моментов путем взаимодействия обмоток-актюаторов, питаемых током от солнечных батарей, с геомагнитным полем [7]. Такие системы работоспособны лишь на низких орбитах, где геомагнитное поле достаточно сильное, а на высоких, в частности, геостационарных орбитах, как правило, используемых для размещения спутников связи, они неприменимы. Здесь же этих ограничений нет. Кроме того, установив, по меньшей мере, два электромагнитных движителя вне центра массы ИСЗ, можно не только управлять его ориентацией по углу, но и изменять высоту орбиты по составленной из сопряженных дуг окружности извилистой траектории, на которую не распространяется запрет на изменение положения центра массы замкнутой системы изнутри.

III. Униполярная индукция – явление, сопутствующее электрической конвекции в распределенной LC -структуре

Значительно более сильные (в связи с их магнитной природой) процессы, имеющие в своей основе униполярную индукцию, в распределенной LC -структуре протекают в зазоре между обмотками – в описанной модели внутри основных брусков из активного диэлектрика). Проявление в них униполярной индукции возможно потому, что эти бруски, с одной стороны, намагничены вдоль, с другой – поперек них проходит тот же самый непрерывный ток, который, проходя по обмоткам, намагнитил бруски. Причем

изменение внутри брусков формы тока – из тока проводимости I в ток поляризации I_p (рис. 3 а), – на его магнитном действии не сказывается, что также было опытным путем подтверждено А. Эйхенвальдом. Этот вид электромагнитных вращений, неразрывно связанный с первым, также заслуживает подробного рассмотрения в силу его потенциальной значимости.

Явление униполярной индукции состоит в том, что в намагниченном теле, движущемся непараллельно оси намагничивания, возникает ЭДС, направленная перпендикулярно плоскости, в которой расположены векторы магнитной индукции и скорости движения тела [8]. По этому принципу действуют униполярные генераторы. Униполярные двигатели используют его обратимость – ток, пропущенный через намагниченное тело непараллельно оси намагничивания, при необходимых условиях приводит его в движение перпендикулярно плоскости, в которой расположены векторы тока и магнитной индукции. Такая ситуация, как было показано выше, складывается ли в них необходимые условия движения? Ответ, конечно, отрицательный, поскольку для движения необходимо как минимум наличие соответствующей степени свободы, отсутствующей в пределах каретки модели, ведь униполярная индукция подчиняется принципу относительности, согласно которому ЭДС в движущемся теле возникает лишь с точки зрения неподвижного наблюдателя, а в униполярных двигателях возможно лишь относительное вращение, т.е. при подведении тока с неподвижной позиции, способной воспринять реактивный вращающий момент.

Неожиданная параллель, которую можно провести между униполярной индукцией и электрической конвекцией, состоит в том, что в современной литературе предпочитают избегать этот термин, считая его неудачным. Представляется, что аналогичны и причины – ограниченное по умолчанию понимание этого явления как относящегося только к технике постоянного тока, использующей постоянные по направлению вектора магнитной индукции магниты. Постоянными принято считать магниты из заранее намагниченного магнитотвердого ферромагнетика, но в указанном смысле постоянным является и электромагнит с обмоткой, питаемой постоянным током. Различает же их то, что это ограничение для униполярной индукции – дань традиции. Объективные причины для отнесения униполярных машин к машинам постоянного тока отсутствуют, их отличает от универсальных по отношению к роду тока машин с чередующимися полюсами инвариантность поля по отношению к угловому перемещению ротора. Известно предложение считать таким отличием однородность поля в рабочем зазоре. Под эту формулировку подпадают и дисковые (торцевые) исполнения униполярных машин, силовое поле которых, будучи осесимметричным, неоднородно: его

индукция возрастает обратно пропорционально радиусу) силового (в частности, магнитного) поля. В действительности униполярные машины переменного тока были изобретены в СССР более 70 лет назад [9] и считались перспективным типом генераторов сверхнизких частот (0,3÷1,1 Гц) для электромагнитного перемешивания жидких металлов [10]. Их особенность в том, что генерируемая частота от скорости вращения ротора не зависит: они служат электромашинными усилителями мощности, подаваемой в цепь возбуждения. Известно, что отсутствие зависимости генерируемой частоты от скорости вращения ротора присуще и используемым в генераторном режиме универсальным коллекторным машинам. Трудности коммутации, однако, никогда не позволили бы получить токи тех же величин, которые способен пропустить непрерывный токосъем униполярных генераторов. Поэтому в данном качестве до появления силовой полупроводниковой электроники они были вне конкуренции. Вторая уникальная особенность униполярных машин в том, что их безобмоточный ротор практически безындукционный и позволяет иначе воспользоваться первой особенностью: получать сколь угодно малые скорости вращения (вплоть до нулевых – в моментных двигателях) при беспрецедентно высоких для электромеханики частотах питания (вплоть до сверхвысокой частоты (СВЧ)), ограниченных только волновыми процессами в обмотках индуктора. Именно с этой, пока не нашедшей применения, особенностью униполярных машин связаны уникальные возможности, которые открываются при их исполнении в виде распределенных LC -структур, питаемых токами СВЧ. Эти особенности будут описаны далее.

Другим, распространенным не только среди дилетантов заблуждением в отношении униполярных машин, является то, что, по крайней мере, в некоторых из них третий закон Ньютона не соблюдается. Однако простой здравый смысл подсказывает, что столь аномальное поведение машин, которые применяются в течение долгого времени, не оставалось бы незамеченным. Несмотря на обилие убеждающих в этом публикаций, объективного подтверждения пока нет. Имеются демонстрации якобы аномального вращения ротора униполярных двигателей, у которых статор в привычном понимании, т.е. с закрепленными магнитами, отсутствует. Последовательное применение к ним законов электродинамики убеждает, что вращение магнитов вместе с ротором не препятствует выполнению третьего закона Ньютона. Покажем на модели (рис. 3, а), что относительно сильные проявления униполярной индукции не препятствуют слабым проявлениям электрической конвекции, обеспечивающим режим движителя вращения.

Ток I от источника δ , циркулируя по замкнутому контуру, на разных его участках меняет форму: переходит из тока проводимости, сосредоточенного в проводах обмоток и выводах, в равный ему по величине радиальный

ток поляризации I_p , распределенный по веществу активного диэлектрика внутренних брусков 3. Обмотки 1 и 2 формируют скрещенные с этими токами аксиальные магнитные потоки, полные в основном бруске 3 и половинные во вспомогательных брусках 4, 5, поскольку магнитный поток, замыкаясь через них, разделяется на две параллельные ветви. Следовательно, полная сила магнитной природы F_m , приложенная к основному бруску 3, компенсируется двумя аналогичными по природе половинными силами $F_m/2$, приложенными к выводам обмоток 1, 2, направленными навстречу первой потому, что сцепленные с этими токами магнитные поля напряженностью H и $H/2$ тоже встречные. Эти силы и создают момент, противодействующий моменту, стремящемуся привести в движение основные бруски из активного диэлектрика, тот самый реактивный момент, который обеспечивает выполнение третьего закона Ньютона. Но поскольку обмотки вместе со своими выводами скреплены с брусками, проявления униполярной индукции в этой модели латентны и приводят к внутренним механическим напряжениям сдвига, не переходящим во вращение в связи с отсутствием необходимой степени свободы. Чтобы их актуализировать, необходимо так трансформировать описанную модель, чтобы добавить ей внутреннюю степень свободы – относительного вращения. Для этого нужно выделить из нее часть, способную вращаться – ротор.

IV. Электродинамическая униполярная система (ЭУС) – основа практических конструкций электромеханических преобразователей энергии через инвариантное по отношению к угловому перемещению ротора электромагнитное поле, осциллирующее на СВЧ

Варианты реализации распределенной LC -структуры с двумя степенями свободы, которую предложено именовать ЭУС, а также некоторые конструкции электромеханических преобразователей энергии на ее основе для случая независимого возбуждения описаны в [5]. Поэтому в этом разделе целесообразно рассмотреть их тоже в плане новой концепции, концепции последовательного возбуждения, послужившей конкретным техническим решением задачи создания таких преобразователей, которая ранее фактически была лишь поставлена. В описанном цилиндрическом варианте конструктивного исполнения распределенной LC -структуры тоже можно выделить ротор: в виде помещенного с двойным радиальным зазором полого цилиндра из активного диэлектрика. Значительно более широкими функциональными возможностями обладает дисковый вариант, где обмотки выполнены в виде плоских спиралей (Архимеда), между которыми с двойным аксиальным зазором помещен радиально намагниченный диэлектрический диск. Этот вариант может также рассматриваться как результат ряда преобразований конструктивной схемы простейшей дисковой униполярной машины с вращающимся ротором-магнитом (рис. 4).

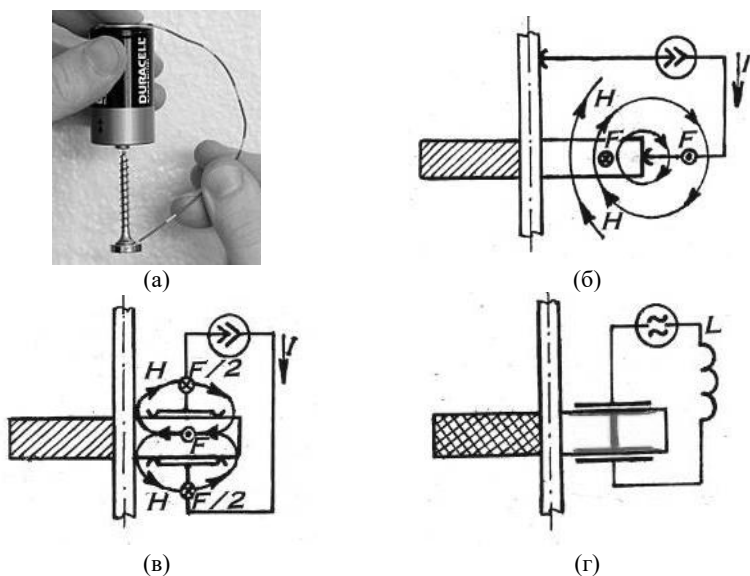


Рис. 4. Ряд преобразований простейшей дисковой униполярной машины

Fig. 4. A series of transformations of the simplest disk unipolar machine

Прототип, известный по легко повторяемому опыту (рис. 4, *a*), характеризуется конструктивной схемой (рис. 4, *б*), где показаны замкнутые силовые линии ротора (напряженности магнитного поля H), пересекаемые током I от источника дважды: в роторе и в подводящем проводнике, с образованием двух встречно направленных сил F : активной и реактивной. Под их действием ротор вращается согласно третьему закону Ньютона. В электромеханике корректно дуально-инверсное преобразование: токи и магнитные потоки можно менять местами без потери работоспособности машины. Применяв его к прототипу, получим конструктивную схему (рис. 4, *в*), в которой ротор намагничен радиально, а ток, подводимый к ротору через развитые по площади скользящие контакты, проходит через него аксиально, по-прежнему сохраняя баланс активной и реактивной сил – только теперь реактивная сила, в результате разделения магнитного потока вне ротора на две параллельные ветви, складывается из двух половинных составляющих $F/2$. Поскольку в результате получились скользящие контакты максимально возможных площадей, появилась возможность эффективной замены их емкостными контактами с одновременной заменой источника постоянного

тока на источник переменного, а радиально намагниченного металлического ротора – на диэлектрический (рис. 4, з). Сквозь ротор могут быть пропущены электропроводные стержни, а на торцах расположены емкостные электроды, не образующие КЗ витков, что не обязательно, а на СВЧ вредно: магнитного действия привязанного к веществу активного диэлектрика тока поляризации достаточно [11]. Поскольку активных потерь в емкостных контактах через воздушные зазоры нет, они в принципе могут работать даже эффективней жидкометаллических в резонансном режиме, когда их емкостные сопротивления компенсируются индуктивным сопротивлением цепи циркуляции тока, условно сведенным на (рис. 4, з) к внешней индуктивности L . Оптимально, если резонансный режим обеспечивается индуктивностью обмоток распределенной LC -структуры, радиально намагничивающих ротор.

Различные модификации последнего варианта этой конструктивной схемы с детализацией до элементов распределенной LC -структуры – ЭУС, различающиеся по числу внешних выводов, изображены на рис. 5.

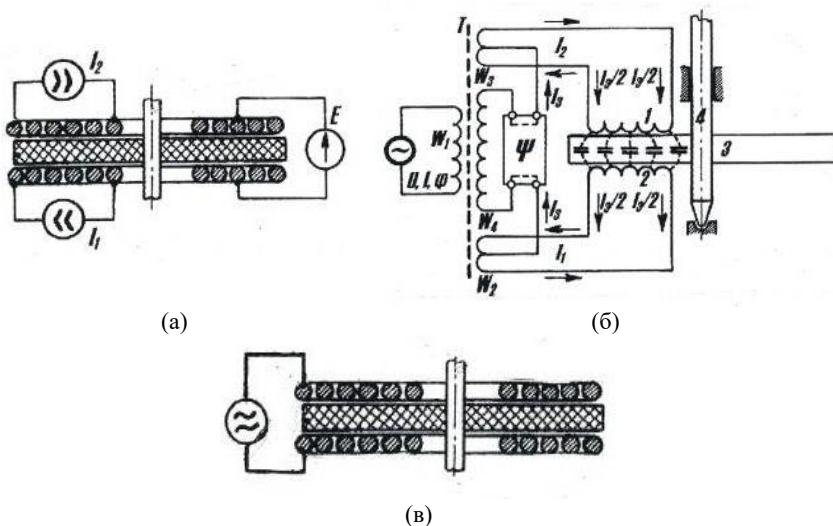


Рис. 5. Модификации ЭУС с различными вариантами обмоток индуктора: 3 вывода, min 4 слоя (а); 2 вывода, min 2 слоя (б); 1 вывод, min 1 слой (в)

Fig. 5. Modifications of EUS with different variants of inductor windings: 3 pins, min 4 layers (a); 2 pins, min 2 layers (b); 1 pin, min 1 layer (c)

Особенность ЭУС состоит в том, что в ней отдельные емкостные электроды отсутствуют, а обмотки, составляющие распределенную LC -структуру, образуют электромагнитный индуктор, радиально намагничивающий ротор и подающий аксиальный ток. Развязка его магнитного действия с электрическим (условие независимости возбуждения), при отсутствии отдельных емкостных электродов, достигается разделением аксиального тока на две параллельные ветви, магнитные поля которых компенсируются. В варианте 5 (а) это разделение происходит непосредственно в обмотках, подключенных к источнику заряжающей ЭДС E своими средними точками, а к источникам намагничивающих токов I_1 и I_2 крайними точками. В варианте 5 (б) вторичная обмотка W_4 согласующего трансформатора T , являющаяся источником заряжающей ЭДС, подключена к средним точкам вторичных обмоток W_2 и W_3 – источникам намагничивающих токов, подключенным к обмоткам индуктора крайними точками – фазоповоротную схему Ψ , задающую нужные фазовые соотношения [11].

Изображенные на рис. 5 модификации ЭУС – принципиальные схемы, эффективности которых для промышленного применения явно недостаточно из-за того, что их магнитная цепь разомкнута. Основу практических вариантов двигателей на базе ЭУС составляют пакетированные конструкции с замкнутой магнитной цепью, для которых критически важное значение имеют толщины обмоток индуктора, образующих немагнитные зазоры. Поскольку их внешние выводы могут располагаться снаружи (внутри проходит вал), трехвыводные обмотки (рис. 5, а), должны быть, как минимум, четырехслойными, а двухвыводные (рис. 5, б) – двухслойными.

Второй вариант не только существенно эффективней первого, но и гораздо технологичней, поскольку позволяет выполнять обмотки индуктора в виде тонких двусторонних печатных плат – статорных галет [12]. Однако очевидно, что он допускает возможность работы на ВЧ, но никак не на СВЧ (более 10^8 Гц), где двухслойные обмотки принципиально неприменимы из-за утечек тока через межслойные емкости. В этом плане переход на последовательное возбуждение ЭУС и одновыводные однослойные обмотки индуктора с крайне малыми паразитными емкостями (рис. 5, в) качественно меняет ситуацию, поскольку позволяет приблизиться к частоте внутреннего резонанса ЭУС, оптимальной по уровню удельных энергетических показателей. Субгигагерцевые ее значения определяются малостью как межобмоточных емкостей через двойной аксиальный зазор и диэлектрик ротора, так и собственных индуктивностей обмоток, которые, образуя немагнитные зазоры в магнитной цепи, не могут быть чрезмерно толстыми. В принципе, путем включения последовательно с ЭУС внешней индуктивности, резонансную частоту можно понизить до любой заданной величины – но если ее значение будет многократно превышать собственную индуктивность

ЭУС, то это окажется энергетически неэффективным.

В приведенном примере такой обмотки (рис. 6) она представляет собой кольцевую двустороннюю печатную плату (в конструктивно-технологическом отношении, одновыводные печатные обмотки целесообразно выполнять двухслойными: состоящими из зеркально-симметричных плоских спиралей, расположенных с обеих сторон несущей диэлектрической мембраны. Поскольку обе спирали соединены в начальных точках, в электрическом отношении такие обмотки – далее называемые симметричными – однослойные) с основой – несущей мембраной – из тонкого диэлектрика, по диаметру которой расположены два выступа с отверстиями для прохождения стержней статора. Центральное отверстие предназначено для прохождения вала ротора. Проводниковые рисунки – плоские спирали, начинающиеся с правого по рис. 6 выступа – зеркально симметричны: первый рисунок совпадает с проекцией второго, и наоборот. Левый по рис. 6 выступ для прочности с обеих сторон металлизирован, но электрически со спиралями не связан.

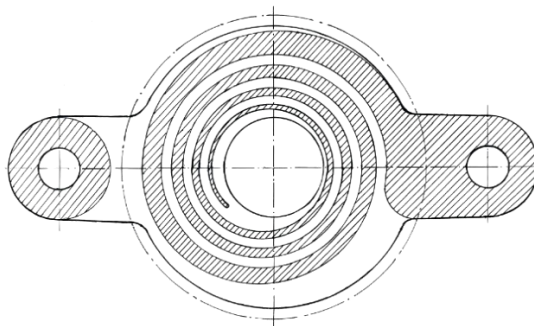


Рис. 6. Одновыводная симметричная обмотка СВЧ индуктора ЭУС (штрихпунктирная окружность – проекция края ротора)

Fig. 6. Single-contact symmetrical winding of the electrodynamic unipolar system SHF inductor (dash-dotted circle – projection of the rotor edge)

Неравномерная токовая нагрузка на проводник – убывающая от максимума в начале до минимума в конце – позволяет сделать ширину проводника и шаг спирали переменными: уменьшающимися по мере приближения к центру. Прогрессивная обмотка позволяет частично компенсировать потерю индуктивного действия, связанную с постепенным убыванием тока, текущего по ее виткам. Зазор же между витками, для уменьшения межвитковых емкостей, следует уменьшать в меньшей степени или сохранять по-

стоянным. С другой стороны, переменная ширина проводника обмотки влечет неравномерность его емкостного действия: максимальную у краев, где проводник шире, и минимальную у центра, где проводник уже. Если не принять специальных мер, то внутренняя часть обмотки будет работать неэффективно, поскольку ток до нее практически не дойдет, ответвившись, в основном, от крайних витков.

Мера, способная этому воспрепятствовать, очевидна – чечевицеобразное профилирование роторных дисков, в результате чего аксиальные зазоры между индукторами и роторами становятся клиновидными: плавно убывающими от краев к центру. Чечевицеобразные роторы целесообразны и по другим соображениям – в частности, механической прочности, поскольку они способны выдержать большие угловые скорости без разрушения под действием центробежных сил, чем плоские роторы.

В итоге требования к электромеханической части электроприводов на базе ЭУС, для которых можно прогнозировать достижение беспрецедентно высоких для электромеханики удельных энергетических показателей, следующие.

1. Пакетное построение, при котором весь активный диэлектрик сосредоточен в роторных дисках, окружающих каждую из обмоток индуктора с двух сторон. Благодаря этому, используются прямая и обратная ветви коллинеарного обмотке магнитного потока и обе составляющие ортогонального обмотке электрического поля – от каждой из сторон проводника. Это оптимальное по соотношению «поверхность рабочих зазоров / занимаемый объем» построение подобно многоступенчатым осевым турбинам, где роторные диски – аналоги рабочих колес, а обмотки индуктора – направляющих аппаратов. Учитывая инвариантность электромагнитного поля в зазорах, присущую униполярным системам, теоретический предел эффективности использования объема и массы активных материалов двигателя достигнут.

2. Симметричные одновыводные обмотки индукторов с прогрессивным шагом и переменной шириной проводника – убывающей к центру. При этом плотность тока в проводнике поддерживается на одном уровне на всех его участках.

3. Чечевицеобразные роторные диски и клиновидные рабочие зазоры, выравнивающие по длине погонную емкость и волновое сопротивление $[Z = (L/C)^{1/2}]$ печатных проводников разной ширины, обеспечивая центростремительное распространение энергии поля без отражений.

4. Питание током с частотой, приближающейся к частоте собственного резонанса ЭУС, которая, как показывают оценки, должна лежать вблизи нижней границы СВЧ диапазона в субгигагерцевой области.

Последний фактор, наряду с вышеупомянутыми, способствует достижению рекордно высоких удельных энергетических показателей двигателя, поскольку, чем выше частота осцилляций электромагнитного поля, тем, при прочих равных условиях, больше его плотность энергии – в этом и состоит первопричина преимуществ СВЧ-энергетики [13]. Однако единственное, что пока удается совершать при помощи СВЧ-энергии (кроме ее основных применений для целей радиолокации и связи) – нагревать тела и ускорять заряженные элементарные частицы в технике физического эксперимента. Техническое решение, впервые позволяющее распространить ее преимущества на электромеханику, рассмотрено далее.

V. Концепция интегрального инверторного электропривода

СВЧ-энергия не может столь же просто и эффективно, как обычный переменный ток, передаваться по проводам на дальние расстояния. Однако есть примеры систем, где таких проблем не существует, поскольку в них генератор и потребитель СВЧ энергии – промежуточной ступени преобразования энергии других видов – расположены вплотную. Таковы преобразователи постоянного напряжения (ППН), трансформация которого возможна только через промежуточную ступень переменного тока.

Поскольку массогабаритные показатели трансформатора тем лучше, чем выше его рабочая частота, естественно, что частоты переменных токов, используемых в промежуточных ступенях ППН со схемами на кремниевой элементной базе, гораздо выше промышленных и уже составляют десятки, а то и сотни кГц. Знаковым событием в этом плане стала разработка и освоение американской корпорацией *Efficient Power Conversion Corporation (EPC)* серийного выпуска мощных нитрид галлиевых (*GaN*) транзисторов с улучшенной структурой – *eGaN@FET*, а также интегральных сборок полумостовых схем на их основе, которые уже потеснили силовые кремниевые *MOSFET* в ряде приложений. Переводя промежуточную ступень преобразования энергии в СВЧ диапазон, применение этих приборов, в частности, в ППН, дает столь существенный выигрыш по многим показателям, как массогабаритным, так и термической и радиационной стойкости, что после их появления специалисты стали предсказывать скорый конец эры кремния в преобразовательной технике [14]. Имеются сведения и об аналогичных отечественных разработках [15].

В электромеханике аналогом ППН является один из самых распространенных типов электроприводов – инверторный, у которых между начальным видом энергии – электрическим, и конечным – механическим, имеется ступень переменного тока. Применяемые двигатели – как правило, синхронные машины переменного тока, скорость вращения которых определяется частотой. По этой причине инверторный электропривод отличается от ППН тем, что частота ступени переменного тока у него может быть

выбрана только на основе требуемой скорости вращения, и потому на практике получается на много порядков ниже, чем у ППН, со всеми вытекающими негативными последствиями.

Использование в инверторном электроприводе двигателя ЭУС, скорость вращения которого от частоты не зависит (более того, чем эта частота выше – с учетом рассматриваемых далее ограничений со стороны волновых процессов в ЭУС, не позволяющих повышать ее беспреступно – тем лучше), позволяет создать электропривод принципиально нового типа: инверторный и интегральный одновременно. I^2Drive является интегральным потому, что у него электромеханическая часть – преобразователь – не является пассивной нагрузкой инвертора, а интегрирована в состав его электронной схемы в качестве частотозадающего резонансного элемента.

I^2Drive , таким образом, оказывается аналогом наиболее совершенного вида ППН – резонансных LLC преобразователей, отличающихся возможностью получения высокого КПД, малых габаритов и массы при высоких частотах переключения. Важно, что LLC конфигурация, содержащая две индуктивности (LL), включенные последовательно с одной емкостью (C), исключительно благоприятна в данном случае, поскольку в нем основная L – собственная индуктивность пакетированной ЭУС, уменьшена относительно одной секции пропорционально числу параллельно соединенных секций, а основная C – собственная емкость, напротив, увеличена пропорционально числу секций. Поэтому возможность увеличения индуктивности резонансного LC -контра, где C – собственная емкость пакетированной ЭУС, подключением к нему, по меньшей мере, одной добавочной индуктивности, позволяет компенсировать уменьшение индуктивности вследствие параллельного соединения секций.

Инвертор I^2Drive (рис. 7, вверху) может быть построен, например, на двух интегральных сборках $eGaN@FET$ общего назначения типа $EPC2103$ или $EPC2104$ [14], представляющих собой полумосты, работающие в субгигагерцевом диапазоне (сотни МГц), и позволяющие коммутировать токи порядка 20 А при напряжениях до 100 В, на которых можно построить силовую часть мостовой схемы инвертора ППН типа LLC , применив имеющийся отечественный опыт [16].

Добавочную индуктивность, обеспечивающую резонансный режим, по конструктивным соображениям можно составить из двух симметричных секций L , выполненных в виде спиралей или меандров, начинающихся от кольцевых контактных площадок вокруг крепежных отверстий в печатной плате инвертора, через которые пропущены стержни статора.

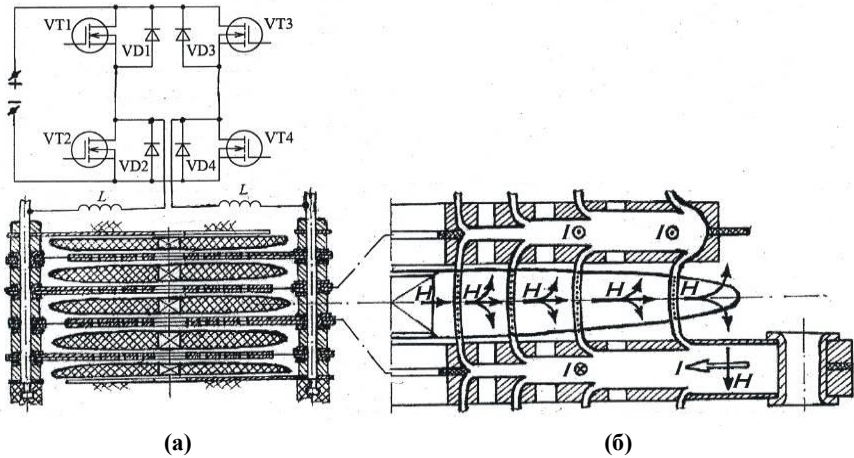


Рис. 7. Интегральный инверторный электропривод на базе ЭУС (I^2Drive): продольный разрез со схемой силовой части СВЧ инвертора на GaN-полумостах: VT1+VT2+VD1+VD2 и VT3+VT4+VD3+VD4 (а); $\frac{1}{2}$ (а): магнитные поля H (напряженности) и токи I (диаграммы) (б)

Fig. 7. Integral inverter electric drive based on electrodynamic unipolar system (I^2Drive): longitudinal section with the scheme of the power part of SHF inverter on GaN-half-bridges: VT1+VT2+VD1+VD2 и VT3+VT4+VD3+VD4 (а); $\frac{1}{2}$ (а): magnetic fields H (tenseness) and currents I (diagrams) (б)

В пакетированной ЭУС I^2Drive (а), в частности, 4-х секционной, снизу вверх чередуются: 1-й поляризованный электрод, 1-й роторный диск, 1-я обмотка индуктора, 2-й роторный диск, 2-я обмотка индуктора, 3-й роторный диск, 3-я обмотка индуктора, 4-й роторный диск, 4-я обмотка индуктора, 5-й роторный диск, 2-й поляризованный электрод. Печатные обмотки индуктора (подобные, в частности, изображенной на рис. 6), через отверстия в выступах надеты на стержни статора, чередуясь на них с проставочными втулками, обеспечивающими соединение выводов обмоток и заданные зазоры. Каждая из последующих обмоток надета с поворотом на 180° относительно предыдущей, но без переворота, с целью задания встречных направлений токов, протекающих по виткам смежных обмоток. Профилированные роторные диски из активного диэлектрика надеты на вал, например, квадратного сечения (условно не показан), причем профили крайних дисков могут отличаться от профилей средних (как показано), поскольку через них замыкаются магнитные потоки только от одной обмотки.

Поляризационные электроды в виде шайб с радиальными разрезами, выполненными напротив статорных стержней (во избежание образования КЗ витков) – емкостные заместители отсутствующих обмоток – расположены перед первым и за последним роторными дисками для вовлечения их в работу. Пакет завершен печатной платой инвертора (условно не показана), соединенной с выводами обмоток через стержни статора.

Ток I от схемы инвертора (рис. 7, б) вводится через обмотку индуктора, изображенную внизу и начинающуюся с правого выступа. В его отверстие, с целью соединения симметричных сторон обмотки и повышения механической прочности (выступы воспринимают реактивные моменты), установлена трубчатая заклепка. Первоначально ток I , следуя к виткам обмотки по металлизации выступа, весь представлен в форме тока проводимости и максимален (наибольшая ширина полоски на диаграмме). Далее, продвигаясь к центру, ток I попадает под емкостное действие соединенных с другим выводом инвертора смежных обмоток индуктора (нижняя обмотка условно не показана), и от него в обе стороны – уже в форме токов смещения – идут ответвления (сужение полосок на диаграмме). Это соответствует накоплению на поверхностях обмоток связанных зарядов, порождающему сопутствующий эффект второго порядка – слабое самовращение (авторотация) I^2Drive как единого целого по механизму электрической конвекции.

Емкостные промежутки между смежными обмотками индуктора резко неоднородны: они по центру заполнены веществом активного диэлектрика роторных дисков, а по краям расположены аксиальные зазоры. Поэтому на уровне роторных дисков ответвляющиеся в аксиальном направлении токи смещения по большей (кратной ϵ) части меняют форму – становятся токами поляризации молекул активного диэлектрика (условно показанных точками), приобретая тем самым жесткую привязку к его веществу. Ответвляющиеся токи изображены на диаграмме полосками одной ширины, соответствующей близким их значениям. Очевидно, что если бы аксиальные зазоры не были клиновидными, то такое было бы невозможно, поскольку токи поляризации сконцентрировались бы, в основном, по краям обмоток, где их проводники наиболее широки, а внутренние части обмоток практически не работали бы.

При этом через роторные диски проходят радиальные магнитные потоки напряженностью H , порожденные встречно направленными токами проводимости I , проходящими по виткам прилегающих обмоток. В результате взаимодействия скрещенных и синхронно осциллирующих магнитных потоков и токов поляризации, к молекулам активного диэлектрика прилагаются тангенциальные пондеромоторные силы, которые и образуют вращающий момент.

Образование реактивного момента, приложенного к статору, показано скрещенными векторами I и H , изображенными на токоподводящем выступе обмотки. Поскольку через него протекает радиальный ток проводимости и замыкаются в аксиальном направлении радиальные магнитные потоки смежных роторных дисков, образуется сила Ампера, противодействующая моменту ротора. Очевидно, что замыкание магнитных потоков смежных роторных дисков, в основном, по краям – через токоподводящие выступы обмоток – возможно лишь при очень высоких значениях μ активного диэлектрика. Но поскольку ферриты для работы на СВЧ имеют очень невысокие значения μ , аксиальное замыкание радиальных магнитных потоков роторных дисков будет происходить и на внутренних их частях, что изображено на рис. 7 ответвлениями от векторов H в обе стороны. Не исключено даже, что окажется целесообразным использование для роторных дисков немагнитных, но обладающих низкими потерями на СВЧ и прочных диэлектриков с повышенным ϵ , например, алюминоксидной керамики.

Следовательно, обмотки индуктора будут пронизывать ортогональные магнитные потоки существенной величины не только по краям, но и везде. Также на всей их поверхности имеет место радиальная составляющая тока проводимости, обусловленная тем, что витки обмоток сходятся к центру. Поэтому описанный механизм образования реактивного момента не ограничивается токоподводящими выступами, а распространяется и внутрь обмоток. В итоге оказывается, что силовые электромагнитные взаимодействия в ЭУС F^2Drive имеют сложный распределенный характер и требуют учета множества разнообразных факторов, в первую очередь – волновой природы процессов. Это делает их исключительно сложным предметом для математического моделирования, возможно, требующего применения суперкомпьютерной техники. Поэтому и была предложена низкочастотная физическая модель F^2Drive , волновыми процессами в которой можно пренебречь, и которую проще описать и исследовать.

VI. К постановке задачи учета волновых процессов в ЭУС

Волновые процессы при передаче электромагнитной энергии существенно проявляются и требуют учета на расстояниях, соизмеримых с длиной волны λ распространяющегося сигнала (как правило, от $0,1\lambda$). При этом под λ понимается длина волны в среде ее распространения, которая может быть много меньше длины волны в свободном пространстве, особенно в т.н. замедляющих линиях, погонные индуктивность и/или емкость которых искусственно увеличены. Учитывая, что обмотки распределенных LC-структур, лежащих в основе ЭУС, именно таковыми и являются, учет волновых процессов в них – не только функциональных, как в электромагнитном двигателе, но и паразитных, способных исказить до неузнаваемости все выше-

приведенные умозрительные построения, необходим. Очевидно, что на месте тангенциальных векторов пондеромоторных сил в роторе униполярного двигателя, в электромагнитном движителе оказываются векторы Пойнтинга поперечной электромагнитной (ТЕМ) волны, циркулирующей в активном диэлектрике между обмотками. Однако отсутствие прямых аналогий между ЭУС и всеми изученными на этот предмет электромагнитными функциональными элементами, в т.ч., из областей радиолокации и связи – основной сферы применения в настоящее время энергии СВЧ – превращает даже постановку такой задачи в серьезную научную проблему, вынуждая пока ограничиться следующими очевидными соображениями:

- рабочая частота ЭУС может быть тем выше, чем меньше размеры ЭУС, по-видимому, достигая сверхвысоких в традиционном понимании значений – более 10^8 Гц – лишь в малых, в особенности, в микромашинах;
- любой электромеханический преобразователь может найти применение при допустимом уровне потерь энергии, которые в ЭУС, наряду с обычными – тепловыми, включают новую для электромеханики составляющую – потери энергии на излучение в окружающее пространство. Очевидно, что они были бы неприемлемыми – если бы не независимое для линейных сред от λ явление полного внутреннего отражения – единственный, пожалуй, безоговорочно полезный волновой процесс, способный локализовать криволинейно распространяющуюся ТЕМ волну;
- аналогично тому, как было введено понятие кондукционной и конвекционной токовой моды в обмотке распределенной LC-структуры, резонно ввести понятия первичной и вторичной (появляющейся в результате вращения) ТЕМ мод во вращающемся диэлектрическом кольце – в т.ч., в роторе двигателя – которые интерферируют и обеспечивают режимы бегущей волны (БВ) при потреблении активно-реактивной энергии, и стоячей волны (СВ) при потреблении чисто реактивной энергии ($\cos\varphi = 0$), т.е. при отсутствии нагрузки на валу или выработке статического момента;
- несмотря на то, что при последовательном возбуждении металл обмоток индуктора и диэлектрик ротора являют собой разные участки одной электрической цепи, по которой протекает непрерывный ток, точной син- или противофазности тока поляризации и магнитной индукцией в роторе может и не быть. Однако, при чрезмерно большом их рассогласовании, выбором параметров обмоток можно довести его величину до допустимой – кратной 180° ;
- сложный распределенный характер силовых электромагнитных взаимодействий в ЭУС I^2Drive , ключевой особенностью которого является инвариантность электромагнитного поля в рабочем зазоре по отноше-

нию к угловому перемещению ротора, предполагает, что при этом в радиальном направлении, т.е. при переходе от витка к витку к центру обмоток, поле может быть переменным: имеющим характер БВ, переносящей энергию от периферии ротора, где обмотки подключены к источнику энергии, к его центру, при наличии ненулевой доли СВ. Кратность 180° сдвига фаз между током поляризации и магнитной индукцией в роторе выдерживается в ближних зонах – в пределах каждого из узких кольцевых участков ротора.

VII. Гибридная униполярная система – основа бесконтактного униполярного двигателя, работающего на относительно низких частотах

Рассматривая задачу создания I^2Drive в описанном виде как программу-максимум, ведущую к революционному прорыву в электромеханике, но требующую высоких материальных и временных затрат, целесообразно в качестве программы-минимум как первого этапа проблемно-ориентированных исследований изучить компромиссный вариант двигателя на основе распределенных LC-структур, обладающий более скромными возможностями, но сохраняющий ключевые отличительные особенности I^2Drive : бесконтактность и инвариантность электромагнитного поля в рабочих зазорах. Такую униполярную систему, названную гибридной в связи с заимствованием у классических униполярных машин ротора, армированного токоведущими стержнями, и статора, участвующего в замыкании магнитной цепи, можно рассматривать не только как физическую модель I^2Drive , позволяющую, абстрагируясь от волновых процессов, доказать на макетном образце, работающем на относительно низких частотах, работоспособность подобных систем, но и как основу практических конструкций униполярных двигателей, обладающих не столь явными преимуществами перед известными, как I^2Drive , но все же существенными.

На рис. 8 двигатель гибридной униполярной системы (ГУС) представлен под изображением обычной цилиндрической униполярной машины [17], чтобы продемонстрировать его аналогию заведомо работоспособному конструктивному прототипу, с учетом преобразования цилиндрического конструктивного исполнения в торцевое и эквивалентной на переменном токе замены скользящих гальванических контактов емкостными.

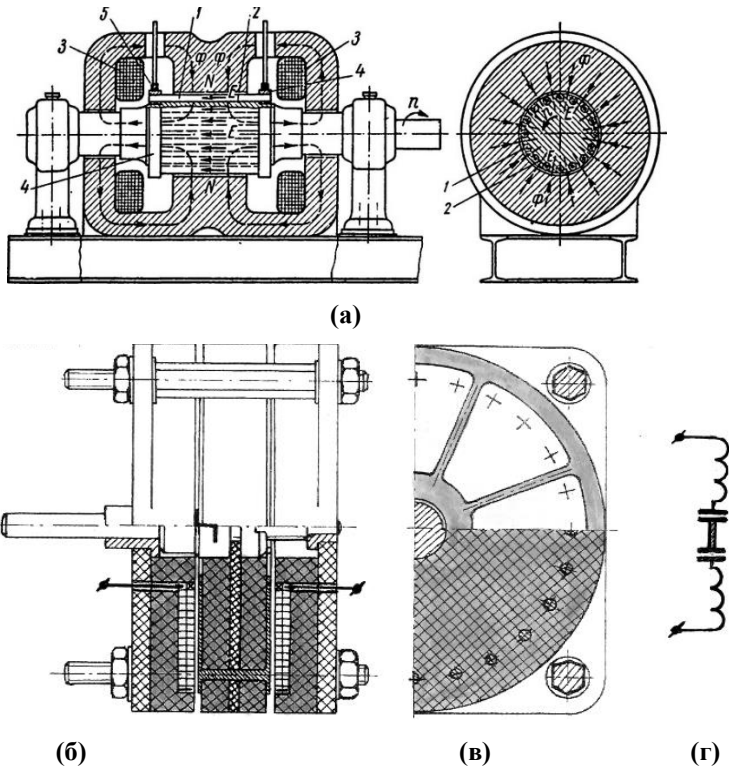


Рис. 8. Цилиндрическая униполярная машина (а) и результат преобразования конструктивного исполнения в торцевое – двигатель ГУС в разрезах: продольном (б); поперечном (в); его схема замещения (г)

Fig. 8. Cylindrical unipolar machine (a) and the result of the transformation of its structural design into a disk one – the hybrid unipolar system motor in sections: longitudinal (b); transverse (c); its replacement scheme (d)

Цель подобной «гибридизации» ЭУС с обычной униполярной машиной – максимально возможное увеличение реактивных параметров (C и L) распределенной LC -структуры для эффективной работы на относительно низких частотах ($10^4 \div 10^6$ Гц), достигается за счет того, что:

- из трех диэлектрических промежутков, определяющих емкость – двух воздушных зазоров и роторного диэлектрического диска – оставлены только первые два, поскольку активные токи в роторе ГУС имеют форму не токов смещения, а, подобно обычным униполярным машинам, токов проводимости, протекающих по металлическим стержням,

пронизывающим ротор. Для этого на поверхности ротора, прилегающие к обмоткам, нанесены емкостные электроды в виде, по меньшей мере, двух секторов, соединенных со стержнями;

- замыкание магнитной цепи в ГУС, в отличие от ЭУС, осуществляется не через обмотки индуктора, образующие немагнитные зазоры, а в обход их. Для этого обмотки помещены в чашеобразные ферритовые сердечники, высота бортов которых равна толщине обмоток. Это снимает ограничения на их толщину, позволяя выполнить обмотки, по меньшей мере, двухсекционными – содержащими, наряду с асимметрично подключенными основными секциями, прилегающими к секторам ротора, расположенные за ними вспомогательные секции, повышающие индуктивность обмоток. В двигателе, изображенном на рис. 7, две таких однослойных секции. Основные подключены к вспомогательным на краях и имеют свободные концы у центра, а вспомогательные, соединяясь на краях с основными, выведены из статора у центра.

Результаты компьютерного моделирования магнитных полей (проведено к.т.н. А.К. Надкиным (НИИЭМ)) в двигателе ГУС приведены на рис. 9 и 10. Очевидно, имеет место подобие структур магнитных полей в ГУС и цилиндрической униполярной машине (рис. 8, а): в обоих случаях магнитные потоки, возбуждаемые протекающими через обмотки индуктора встречно направленными токами, образуют две независимые параллельные ветви, каждая из которых замыкается по краям ротора без захода в его среднюю часть.

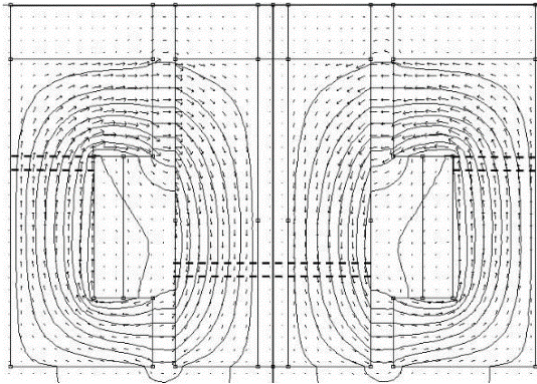


Рис. 9. Магнитные силовые линии ГУС в $\frac{1}{2}$ продольного разреза

Fig. 9. Magnetic lines of force of the hybrid unipolar system in $\frac{1}{2}$ of the longitudinal section

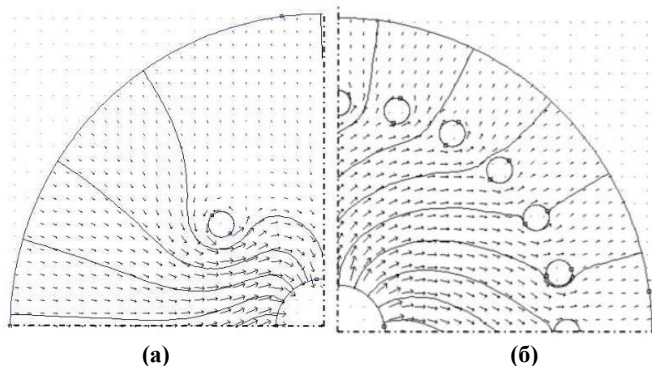


Рис. 10. Магнитные силовые линии ГУС в $\frac{1}{4}$ поперечных разрезах: по статору (а); по ротору (б)

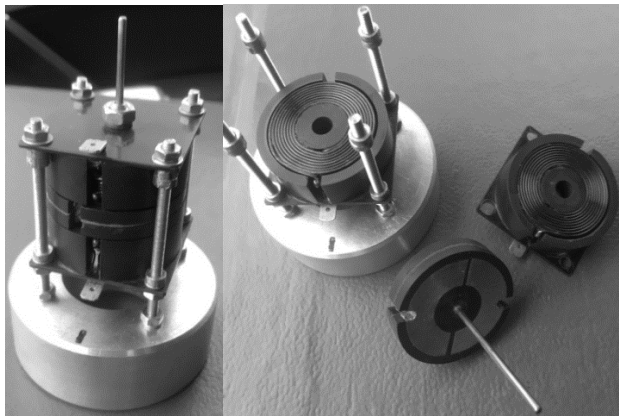
Fig. 10. Magnetic lines of force of the hybrid unipolar system in $\frac{1}{4}$ of the transverse sections: along the stator (a); along the rotor (b)

Это позволяет составить ротор ГУС из трех дисков, из которых активные (ферромагнитные) только крайние, а средний – конструктивный, например, стеклотекстолитовый, служащий для соединения его частей и закрепления ротора на валу.

Рис. 10 показывает образование в двигателе ГУС вращающего момента согласно третьему закону Ньютона. Действующие силы, приложенные к ротору, и противодействующие силы, приложенные к статору, образуются по единому физическому механизму: асимметричной деформации (отклонения в противоположные стороны) магнитных силовых линий вокруг отверстий в ферромагнетике, через которые пропущены проводники с током: в статоре – внешние выводы, в роторе – токонесущие стержни. При этом действующий и противодействующий моменты оказываются равными при любом числе стержней в роторе и радиусе расположения отверстий в статоре, поскольку ток, протекающий через выводы статора, равен сумме токов, протекающих через стержни, а изменение плеч приложения сил, связанное с различием радиусов расположения отверстий, компенсируется изменением величин этих сил при тех же токах, обусловленным неоднородностью осесимметричного поля – обратной зависимостью величины магнитной индукции от радиуса.

По описанной конструктивной схеме был построен макетный образец двигателя ГУС, фото которого приведено на рис. 11. Для его изготовления использовались: сердечник ферритовый Ч48 М2000НМ ПЯ0.707.402ТУ – 4 шт. (2 – в состоянии поставки, 2 – со срезанными бортами), провод обмоточный ПЭТВ-2-1,0 мм, и клемма ножевая 6,3 мм RM 250 (SG 57643 А) –

2 шт. Число стержней в роторе по сравнению с рис. 6 уменьшено до двух, причем желобковые стержни – так же, как и выводы статора – размещены в штатных пазах под выводы, выполненных в сердечниках. Вспомогательные секции обмоток, напротив, увеличены до заполнения имеющихся объемов и спаяны с основными секциями на краях.



**Рис. 11. Макетный образец двигателя ГУС:
слева – в собранном виде, справа – поэлементно**

**Fig. 11. Modeling sample of the hybrid unipolar system:
on the left – in assembly, on the right – element by element**

Запланированную программу экспериментов возможно провести после изготовления лабораторного стенда, основу которого должен составлять перестраиваемый в пределах $10^4 \div 10^6$ Гц электронный генератор частоты, мощность которого соизмерима с мощностью, присущей установкам для термообработки металлов ТВЧ. Это позволит довести токи в обмотках до величин, соответствующих их заметному, вплоть до разрушения изоляции, нагреву, что, учитывая полученное значение емкости ~ 10 Пф, – непростая техническая задача. Таково условие, без выполнения которого отсутствие вращения ротора у простейшего в изготовлении неоптимального макета, нельзя считать убедительным отрицательным результатом и делать на этом основании какие-либо заключения. Пока же, к сожалению, непосредственным подключением к нему лабораторного генератора ГЗ-109 с диапазоном частот 20 Гц \div 200 кГц, привести ротор во вращение не удалось – однако и никаких видимых признаков прохождения тока не наблюдалось, что оставляет этот вопрос открытым.

Последнее, тем не менее, не дает повода считать, что данная публикация преждевременна в связи с тем, что, на первый взгляд, важнейший вопрос – опытное подтверждение одного из следствий выдвинутой гипотезы, опровергающего предубеждение о невозможности создания бесконтактного униполярного двигателя – остался открытым. На самом деле, в истории науки и техники имеются примеры успешно решенных подобных сложных комплексных проблем. Они требуют подключения к ним на разных этапах специалистов разных компетенций. Это было бы невозможным при отсутствии доступной научно-техническому сообществу информации о проблеме как таковой, о том, какие задачи были поставлены и что уже сделано для их решения.

Придерживаясь порядка подачи материала согласно его потенциальной научно-практической значимости, единственное из следствий выдвинутой гипотезы, которое, благодаря ряду упрощений, относительно просто проверяется опытным путем – бесконтактный униполярный двигатель – рассмотрено последним. На наш взгляд, даже если практика покажет, что он – в силу неясных пока причин – неработоспособен, то из этого вовсе не будет следовать отсутствие, по крайней мере, научного интереса у предмета статьи, выходящего за рамки прикладной электромеханики и имеющего фундаментально-научный аспект – в части, касающейся теоретических основ электротехники. Если же, что более вероятно, окажется, что выдвинутая гипотеза истинна во всех своих аспектах, то это будет означать наступление в электромеханике новой эпохи – максвелловской – характеризующейся включением в процесс электромеханического преобразования энергии, наряду с током проводимости, других составляющих полного, в максвелловском понимании, тока – токов смещения (поляризации) и конвекции [11].

VIII. Заключение

У максвелловской электромеханики, в силу ее уникальных возможностей, есть все шансы инициировать очередной виток эволюции вращающихся электрических машин [18]. Его особенностью будет использование в их составе не якоря и индуктора с сосредоточенными реактивными параметрами (как правило – L , реже – C), как теперь, а распределенных LC -структур. Поскольку отказ от реактивных элементов с сосредоточенными параметрами в пользу распределенных присущ технике СВЧ, ясно, что этот путь открывает новые горизонты, впервые позволяя распространить известные преимущества СВЧ энергетики на электромеханику.

Кроме того, интерес вызывает удивительная простота питаемых СВЧ энергией вращающихся машин на базе ЭУС: судя по всему, конструктивная схема, изображенная на рис. 5, в – простейшая из всех принципиально воз-

можных бесконтактных систем, в которых складываются условия для непрерывного электромеханического преобразования. Это является еще одним доводом в пользу того, что если открытие указанных эффектов состоится, то его влияние на дальнейший ход развития электромеханики действительно может стать революционизирующим.

Автор считает своим долгом выразить искреннюю признательность проф., д.т.н. В.А. Конявскому (ОКБ САПР, МФТИ), без поддержки которого эта работа не могла бы быть выполнена, а также к.ф.-м.н. Н.Е. Невескому (ИПМ РАН) (1946–2010), проф., д.т.н. В.Я. Гече и к.т.н. А.К. Надкину (НИИЭМ).

© Лившиц В.И., 2022

Поступила в редакцию 22.04.2022

Received 22.04.2022

Библиографический список

- [1] Эйхенвальд А.А. Электричество. 6-е изд. М.-Л.: ГИЗ, 1931. – 737 с.
- [2] Калашников С.Г. Электричество. М.: Физматлит, 2004. – 624 с.
- [3] Афанасьев А.П. Электрическая конвекция / Энциклопедия Брокгауза и Ефрона. [Электронный ресурс]. URL: <https://slovar.cc/enc/brokhhaus-efron/1688749.html> (дата обращения 24.03.2022).
- [4] Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 6. М.: Мир, 1966. – 528 с.
- [5] Livshits V. Maxwellian electromechanics – the path to create a new type of electro-mechanical energy converters with unique capabilities // proc. 2021 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED), Apr. 27-28, 2021, Prague, Czech. [Электронный ресурс]. URL: http://sed.diag.ru/uploads/swfupload/_sbornik_SED/papers/e05.pdf (Дата обращения 24.03.2022).
- [6] Мультиферроики / Википедия. [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Мультиферроики> (дата обращения 10.02.2022).
- [7] Овчинников М.Ю., Пеньков В.И., Кирюшкин И.Ю. [и др.]. Опыт разработки, создания и эксплуатации магнитных систем ориентации малых спутников. М.: ИПМ, 2002. – 32 с.
- [8] Ишлинский А.Ю. Униполярная индукция // Большой энциклопедический словарь. Политехнический. М.: Большая Российская энциклопедия, 2000. – 656 с.
- [9] Ходоров Т.Я. Униполярная машина переменного тока, Авторское свидетельство СССР № 67095, заявл. 14.08.43; опубл. 01.01.46. – Бюл. № 9.
- [10] Дробинин Я.И., Дробинина Т.Я. Униполярные генераторы сверхнизкой частоты для электромагнитного перемешивания жидких металлов // Труды УПИ. Вып. 156. 1967.
- [11] Лившиц В.И. Введение в максвелловскую электромеханику // Известия Академии электротехнических наук РФ. 2019. № 21. С. 33-49.

- [12] Лившиц В.И. Электропривод электродинамической униполярной системы и галетный электродвигатель, Заявка на изобретение 2019125007 RU, заявл. 07.08.19; опубл. 08.02.21. – Бюл. № 4.
- [13] Диденко А.Н. СВЧ энергетика: теория и практика. М.: Наука, 2003. – 446 с.
- [14] Мощные нитрид-галлиевые (GaN) транзисторы от EPC – конец эры кремния? АО «Компэл». 2015 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.compel.ru/lib/71931> (дата обращения 24.03.2022).
- [15] ОПК создала мощные СВЧ транзисторы. [Электронный ресурс]. URL: <https://zonatex.ru/blog/komputeri/3781.html> (дата обращения 10.02.2022).
- [16] Белов Г.А., Малинин Г.В. Расчет характеристик установившегося режима резонансных преобразователей типа LLC // Известия Академии электротехнических наук РФ. 2021. № 23. С. 7-15.
- [17] Основные конструктивные исполнения электрических машин. [Электронный ресурс]. URL: <https://mydocx.ru/12-39843.html> (дата обращения 24.03.2022).
- [18] Матвеев А.В. Движущие силы и направления эволюции вращающихся электрических машин. Ч. 1 // Электричество. 2021. № 1. С. 44-54. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-1-44-54

References

- [1] A.A. Eichenwald, *Elektrichestvo [Electricity]*, 6th ed. Moscow-Leningrad: GIZ, 1931 (in Russian).
- [2] S.G. Kalashnikov, *Elektrichestvo [Electricity]*. Moscow: Fizmatlit, 2004 (in Russian).
- [3] A.P. Afanasyev, “Elektricheskaya konvekciya [Electric convection]”, in *Enciklopediya Brokgauza i Efrona [Encyclopedia of Brockhaus and Efron]*. [Online]. Available at: <https://slovar.cc/enc/brokhhaus-efron/1688749.html> [Accessed: Mar. 24, 2022] (in Russian).
- [4] R. Feynman, R. Leighton and M. Sands, *Fejnmanovskie lekcii po fizike. Tom 6 [Feynman Lectures on Physics. Vol. 6]*. Moscow: Mir, 1966 (in Russian).
- [5] V. Livshits, “Maxwellian electromechanics – the path to create a new type of electro-mechanical energy converters with unique capabilities”, in proc. *2021 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*, Apr. 27-28, 2021, Prague, Czech. [Online]. Available at: http://sed.diag.ru/uploads/swfupload/_sbornik_SED/papers/e05.pdf [Accessed: Mar. 24, 2022].
- [6] Multiferroics. [Online]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Мультиферройки> [Accessed: Oct. 2, 2022].
- [7] M.Yu. Ovchinnikov, V.I. Pen'kov, I.Yu. Kiryushkin, R.B. Nemuchinsky, A.A. Ilyin, and E.E. Nokhrina, *Experience in the development, building and usage of a magnetic attitude control system for small satellites*. Moscow: IPM, 2002.
- [8] “Unipolyarnaya indukciya [Unipolar induction]”, in *Bol'shoj enciklopedicheskij slovar'. Politekhicheskij [Big encyclopedic dictionary. Polytechnic]*, A.Yu. Ishlinskiy. Moscow: Great Russian Encyclopedia, 2000 (in Russian).
- [9] T.Ya. Hodorov, “Unipolyarnaya mashina peremennogo toka [Unipolar AC machine]”, Pat. USSR 67095, Jan. 01, 1946 (in Russian).
- [10] Ya.I. Drobinin and T.Ya. Drobinina, “Unipolyarnye generatory sverhnikzkoj chastoty

- dlya elektromagnitnogo peremeshvaniya zhidkih metallov [Unipolar ultra-low frequency generators for electromagnetic mixing of liquid metals], *Trudy UPI [Proceedings of the UPI]*, vol. 156, 1967 (in Russian).
- [11] V.I. Livshits, "Vvedenie v maksvellovskuyu elektromekhaniku [Introduction to Maxwellian electromechanics]", *Izvestiya Akademii elektrotekhnicheskikh nauk RF [Proceedings of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation]*, no. 21, pp. 33-49, Dec. 2019 (in Russian).
- [12] V.I. Livshits, "Elektroprivod elektrodinamicheskoy unipolyarnoy sistemy i galetnyy elektrodvigatel [The electric drive of an electrodynamic unipolar system and a one-year electric motor]", Application for invention RU 2019125007, Feb. 08, 2021 (in Russian).
- [13] A.N. Didenko, *SVCH energetika: teoriya i praktika [Microwave energy: theory and practice]*. Moscow: Nauka, 2003 (in Russian).
- [14] Moshchnye nitrid-gallievye (GaN) tranzistory ot EPC – konec ery kremniya? [Powerful gallium nitride (GaN) transistors from EPC – the end of the silicon era?], AO "Compel", Aug. 2015. [Online]. Available at: <https://www.compel.ru/lib/71931> [Accessed: Mar. 24, 2022] (in Russian).
- [15] OPK sozdala moshchnye SVCH tranzistory [OPK has created powerful microwave transistors]. [Online]. Available at: <https://zonatex.ru/blog/komputeri/3781.html> [Accessed: Feb. 10, 2022] (in Russian).
- [16] G.A. Belov and G.V. Malinin, "Raschet karakteristik ustanovivshegosya rezhima rezo-nansnyh preobrazovatelej tipa LLC [Calculation of the characteristics of the steady state of resonant converters of LLC type]", *Izvestiya Akademii elektrotekhnicheskikh nauk RF [Proceedings of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation]*, no. 23, pp. 7-15, July 2021 (in Russian).
- [17] Osnovnye konstruktivnye ispolneniya elektricheskikh mashin [Basic designs of electrical machines]. [Online]. Available at: <https://mydocx.ru/12-39843.html> [Accessed: Mar. 24, 2022] (in Russian).
- [18] A.V. Matveev, "Driving forces and lines of the evolution of rotating electrical machines. Part 1", *Electricity*, no. 1, pp. 44-54, 2021. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-1-44-54 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Лившиц Владимир Иосифович, кандидат технических наук, руководитель группы патентования ЗАО «ОКБ САПР», г. Москва, Российская Федерация.

Vladimir I. Livshits, Cand. Sci. (Eng.), head of the patenting department of the OKB SAPR JSC, Moscow, Russian Federation.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.316.11

DOI 10.46960/2658-6754_2022_2_80

РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 25 кВ В ПРОГРАММЕ РАСТ-05К С УЧЕТОМ ВЗАИМОИНДУКЦИИ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ

Л.А. Герман

филиал Самарского государственного университета путей сообщения
в Нижнем Новгороде
Нижний Новгород, Россия
e-mail: lagerman@mail.ru

К.С. Субханвердиев

Российский университет транспорта
Москва, Россия
e-mail: kamilsub@mail.ru

Программа РАСТ-05К предназначена для совместного расчета режима системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ и системы внешнего электроснабжения, что повышает точность расчета. Однако все расчеты выполняются без учета электромагнитной связи между контактными проводами и рельсами многопутных участков, т.е. основной недостаток программы РАСТ-05К – невозможность вести расчеты тяговых сетей с учетом взаимоиндуктивных связей. Для учета взаимоиндуктивных связей в программе РАСТ-05К предлагается: а) при расчете токов короткого замыкания в тяговой сети следует принять схему замещения тяговых сетей с индуктивно развязанными сопротивлениями и выделением сопротивления рельса, подключая его к контактной сети; б) при расчете потерь напряжения до электроподвижного состава следует к существующим расчетам по РАСТ-05К добавить модель рельсовой цепи с известными параметрами для реализации составляющей потери напряжения от наведенного напряжения. Рассмотрены целесообразная схема замещения, даны примеры расчета по программе РАСТ-05К с учетом наведенного напряжения и соответствующее снижение погрешности расчета. Параметры контактной сети и рельсов принимаются по справочникам. Показано, что для рассмотрения электромагнитных связей достаточно учесть токи в рельсах смежного пути.

Ключевые слова: взаимоиндуктивные связи, контактная сеть, наведенное напряжение, РАСТ-05К, рельсы, совместный расчет, схемы замещения.

Для цитирования: Герман Л.А., Субханвердиев К.С. Расчет системы тягового электроснабжения 25 кВ в программе RAST-05K с учетом взаимоиндукции тяговых сетей // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 2. С. 80-93. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_80

CALCULATION OF 25 kV TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM BY RAST-05K PROGRAM TAKING INTO ACCOUNT MUTUAL INDUCTION OF TRACTION NETWORKS

L.A. German

Branch of the Samara State University of Railway Transport in Nizhny Novgorod
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: lagerman@mail.ru

K.S. Subkhanverdiev

Russian University of Transport
Moscow, Russia
e-mail: kamilsub@mail.ru

Abstract. The RAST-05K program is designed for joint calculation of the mode of the 25 kV AC traction power supply system and the external power supply system. This combination increases the accuracy of the calculation. However, all calculations are performed without taking into account the electromagnetic couplings between contact wires and rails of multi-track sections, i.e., the main drawback of the RAST-05K program is the impossibility of calculating traction networks taking into account mutual induction. It is proposed to make the following adjustments to take into account mutual induction in the RAST-05K: a) the equivalent circuit of traction networks with inductively decoupled resistances and the allocation of rail resistance by connecting it to the contact network should be taken in the calculation of short-circuit currents in the traction network; b) a rail circuit model with known parameters should be added to the existing RAST-05K calculations to implement the voltage loss component from the induced voltage when calculating voltage losses up to the electric rolling stock. An expedient equivalent circuit, examples of calculation using the RAST-05K program, taking into account the induced voltage, and a corresponding reduction in the calculation error are considered. The parameters of the contact network and rails are taken from reference books. It is shown that to consider electromagnetic couplings, it is sufficient to take into account the currents in the rails of the adjacent track.

Key words: contact network, equivalent circuits, joint calculation, induced voltage, mutually inductive connections, rails, RAST-05K.

For citation: L.A. German and K.S. Subkhanverdiev, "Calculation of 25 kV traction power supply system by RAST-05K program taking into account mutual induction of

traction networks”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 80-93, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_80

1. Введение

Программа РАСТ-05К предназначена для расчета режима системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ с учетом режима системы внешнего электроснабжения, разработана в 1999 г. и успешно применяется в проектных организациях, а также в учебных и научных расчетах. Обоснования совместного расчета систем тягового и внешнего электроснабжения даны в [1, 2], а построение программы РАСТ-05К приведено в [3-6]. Главное, что реализовано в программе – совместный расчет систем тягового и внешнего электроснабжения. В расчете мгновенной схемы программа определяет комплексное значение и модуль:

- напряжения по фазам тяговых и районных подстанций;
- напряжения в тяговой сети на токоприемнике электроподвижного состава (ЭПС);
- активное и реактивное токораспределение в схеме;
- уравнивающие токи;
- токи короткого замыкания (КЗ) в любой точке тяговой сети и системы электроснабжения;
- потери активной и реактивной мощности в тяговой сети и в целом по системе электроснабжения;
- матрицу узловых сопротивлений сети;
- по полученным данным рассчитывается несимметрия по току и напряжению в любой точке сети.

Расчеты выполняются с учетом реальных коэффициентов трансформации трансформаторов, установок продольной и поперечной емкостной компенсации.

Основные расчетные формулы, особенности работы с программой и примеры расчета даны в [3, 6]. Однако все расчеты выполняются без учета электромагнитной связи между контактными проводами и рельсами многопутных участков, то есть основной недостаток программы РАСТ-05К – невозможность вести расчеты с учетом взаимоиндуктивных связей тяговых сетей. Причина в том, что в программе РАСТ-05К расчет выполняется в целом для тяговой сети (контактный провод плюс рельс) без выделения сопротивления рельса, а рельсовая цепь представлена цепочкой с нулевым сопротивлением. В [7] рассмотрено индуктивное влияние подвесок разных путей друг на друга, а в [8] уточнено, что создаваемый токами в контактной сети поток, пронизывающий контуры, образуемые рельсами, относительно мал по сравнению с потоками от токов в рельсах и им можно пренебречь. Таким

образом, при учете электромагнитной связи достаточно учесть токи в рельсах соседнего пути.

Цель статьи – показать возможности широко используемой программы РАСТ-05К учесть электромагнитные связи в тяговой сети переменного тока. Учитывая, что многие десятилетия расчеты токов КЗ и других параметров режима в системе тягового электроснабжения переменного тока успешно выполняются с индуктивно развязанными сопротивлениями, логично программу РАСТ-05К модернизировать с применением индуктивно развязанных сопротивления тяговой сети.

Итак, авторы предлагают использовать программу РАСТ-05К для учета взаимоиндуктивных связей следующим способом:

- а) при расчете токов короткого замыкания в тяговой сети следует принять схему замещения тяговых сетей с индуктивно развязанными сопротивлениями и выделением сопротивления рельса так, как это сделано в [9] и вести расчет по существующей программе РАСТ-05К;
- б) при расчете потерь напряжения до ЭПС следует к существующим расчетам по РАСТ-05К добавить потери напряжения до рассматриваемого токоприемника от наведенного напряжения.

II. Расчет токов короткого замыкания

В качестве примера выполним расчет тока КЗ тяговых сетей с индуктивной развязкой. Представлена схема питания двухпутного участка (рис. 1, а) и в соответствии с [9] ее промежуточная схема замещения с КЗ в точке К (рис. 1, б), и окончательная схема замещения с введением сопротивления рельса в цепь контактной сети (рис. 1, в).

На рис. 1 приняты следующие обозначения: 1 и 2 – тяговые подстанции A и B соответственно с напряжением U_A и U_B ; 3 – неповрежденный участок контактной сети (сопротивление Z_2) первого пути; 4 и 5 – поврежденные участки контактной сети (сопротивления Z'_1 и Z''_1) второго пути при КЗ в точке K ; 6 и 7 – участки рельсового пути поврежденного участка при КЗ в точке K (с сопротивлениями Z'_p и Z''_p); 8 – двухпутный участок с неповрежденной контактной сетью между тяговой подстанцией A и постом секционирования (ПС) (сопротивление $Z_{АП}$).

Как видно (рис. 1, б, в), на участке ПС – B КЗ на одном пути в точке K . Поэтому в соответствии с [9] в схеме замещения с индуктивно развязанными сопротивлениями элементов тяговой сети сопротивления рельсов соединены последовательно с сопротивлениями контактной сети. В точке K включено переходное сопротивление, в соответствии с [10] обычно оно – активное.

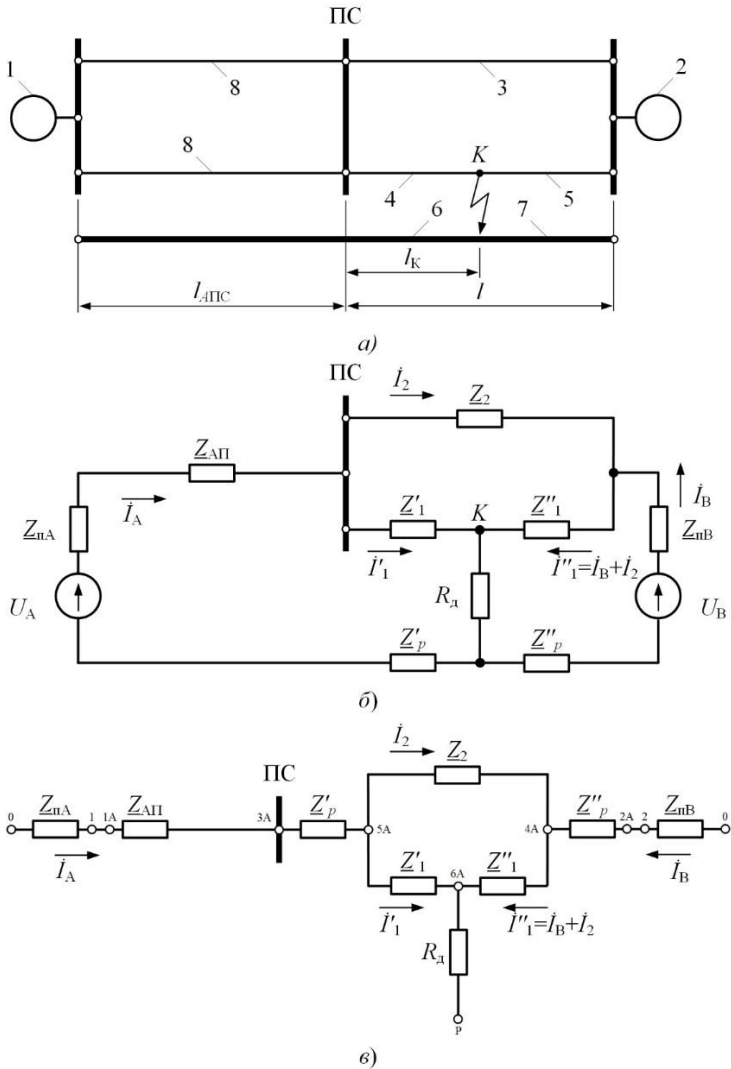


Рис. 1. Схема двухпутного участка переменного тока с КЗ: схема электроснабжения (а); схема замещения (б); схема замещения с введением рельсовой цепи в цепь контактного провода (в)

Fig. 1. Scheme of a double-track section of alternating current with short circuit: power supply scheme (a); equivalent circuit (b); equivalent circuit with the introduction of a track circuit into the contact wire circuit (c)

Схема на (рис. 1, в) приведена в [9] и полностью применима для программы РАСТ-05К в расчетах тяговых сетей с индуктивно развязанными сопротивлениями. При этом сопротивления $Z_{пЛ}$, $Z_{пВ}$ (и клеммы 0, 1, 2) принадлежат системе внешнего электроснабжения, а клеммы от 1 до 6 А и сопротивление R_d (клемма P – рельс) подключаются в тяговой сети.

Что касается участка A – ПС без КЗ, то здесь достаточно использовать сопротивление по справочнику [11] – z_{22} для сопротивления параллельно соединенных двух путей тяговой сети, которое определено с учетом индуктивно развязанных сопротивлений. При рассмотрении каждого пути и отдельно рельсовой цепи [9] применяют для контактной сети погонное сопротивление z_{-12} , а для рельсов (погонное сопротивление $z'_{p,2}$) учитывают взаимное индуктивное влияние контактных сетей всех путей друг на друга (значения z_{-12} и $z'_{p,2}$ даны в [11]).

Параметры сопротивлений в схеме по (рис. 1, б) даны в табл. 1. Расстояния между подстанциями A и B – 50 км, пост секционирования ПС находится посередине.

Таблица 1.
Параметры схемы (рис. 1, б) для расчета тока КЗ

Table 1.
Circuit parameters (Fig. 1, b) for calculating the short-circuit current

Участки	Длина, км	Погонные сопротивления			R , Ом	X , Ом
		обозначения	r , Ом/км	x , Ом/км		
8	25	z_{22}	0,111	0,286	2,775	7,15
6	4	$z'_{p,2}$	0,029	0,136	0,116	0,544
7	21	$z'_{p,2}$	0,029	0,136	0,609	2,856
3	25	z_{-12}	0,163	0,292	4,075	7,3
4	4	z_{-12}	0,163	0,292	0,652	1,168
5	21	z_{-12}	0,163	0,292	3,423	6,132
9					8(0,1)	

Напряжение источника питания, приведенное к напряжению тяговой обмотки, равно 28 кВ. Расчеты токов КЗ выполнены для двух режимов (Прил. 1 и 2) с переходным сопротивлением в цепи КЗ – 0,1 и 8 Ом (строка 9 в табл. 1). Одновременно в приложениях показаны формы представления результатов расчета с исходными данными.

Если переходное сопротивление в месте КЗ $R_d = 0,1$ Ом (Прил. 1), то ток КЗ равен 4,358 кА с фазой -76° , а если $R_d = 8$ Ом (Прил. 2), то ток КЗ равен 2,474 кА с фазой $-33,4^\circ$. В прил. 1 и 2 приведены исходные данные по схемам и параметрам участка и результаты расчета. Программа РАСТ-05К дает очень важный показатель – активную и реактивную мощность в

тяговой сети: по Прил. 1 $S = 29,379$ МВА, по Прил. 2 $S = 57,802 + j19,07$ МВА. Как указано в [10], место КЗ эффективно определяется по реактивной мощности, для этого с успехом можно использовать программу РАСТ-05К. При расчете без учета наведенного напряжения получен ток КЗ при $R_d = 0,1 - 4,023$ кА, а так как по Прил. 1 ток КЗ – 4,358 кА, то погрешность расчета без учета электромагнитного влияния составит 8 %.

III. Расчет потерь напряжения до ЭПС

Рассмотрим раздельную работу путей двухпутного участка. Потери напряжения $U_{к1}$ до нагрузки к1 на первом пути можно найти из выражения:

$$\Delta U_{к1} = \Delta U'_{к1} + \Delta U''_{к1} + \Delta U'''_{к1}, \quad (1)$$

где $\Delta U'_{к1}$ – потеря напряжения до рассматриваемого поезда, вызванная нагрузкой рассматриваемого поезда; $\Delta U''_{к1}$ – потеря напряжения до рассматриваемого поезда, вызванная нагрузкой поезда j , расположенного на том же пути; $\Delta U'''_{к1}$ – то же, но вызванная только током в рельсах, например, поезда j_1 , расположенного на смежном втором пути.

Составляющая $\Delta U'''_{к1}$ определяется:

$$\Delta U'''_{к1} = r'_{p,2} I_{21} I_{21} + x'_{p,2} I_{21} I_{21}, \quad (2)$$

где I_{21} и I_{21} – ток и расстояние поезда на втором пути; $r'_{p,2}$ и $x'_{p,2}$ – погонные сопротивления рельсов при наведенном напряжении от второго пути (определяются по данным [11]).

По программе РАСТ-05К определяются составляющие $\Delta U'_{к1}$ и $\Delta U''_{к1}$. Что касается составляющей $\Delta U'''_{к1}$, т.е. два пути ее определения. Во-первых, достаточно просто сделать дополнительный расчет по (1), и дополнительную потерю напряжения от наведенного напряжения прибавить к первым двум составляющим. В этом случае все расчеты выполняются по существующей программе РАСТ-05К. Если на втором пути несколько поездов, то тогда, во-вторых, есть смысл модернизировать программу РАСТ-05К с дополнением модели рельсовой цепи с параметрами $\underline{z}'_{p,2}$ ($r'_{p,2}$, $x'_{p,2}$), где будет полная автоматизация расчетов потерь напряжения с учетом взаимоиндукции тяговых сетей. Формула для расчета наведенного напряжения от нескольких нагрузок приведена в [8].

Проведем пример расчета потерь напряжения до токоприемника поезда по первому пути с током I_{11} при учете наведенного напряжения от поезда с током I_{21} на соседнем пути (рис. 2).

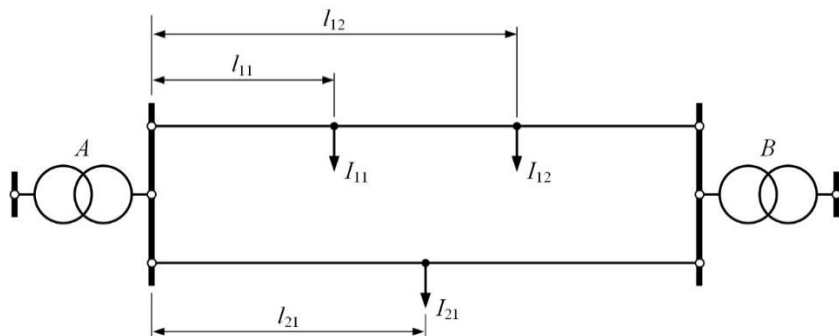


Рис. 2. Схема электроснабжения участка с тяговыми токами

Fig. 2. Scheme of power supply of a section with traction currents

Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2.
Параметры тяговой нагрузки на рис. 2

Table 2.
Traction load parameters on fig. 2

Обозначения	I_{11} , А	l_{11} , км	I_{12} , А	l_{12} , км	I_{21} , А	l_{21} , км
Значения	200	20	300	40	400	30

По расчету потери напряжения до указанного поезда от токов по первому пути без учета наведенного напряжения составляют – 1692 В. При учете наведенного напряжения, рассчитанного по (1), потери напряжения увеличились до 3360 В. Как видно, при не учете наведенного потери напряжения примерно в два раза меньше реальных значений.

Показана возможность совместного расчета систем тягового и внешнего электроснабжения с помощью программы РАСТ-05К, при этом учитывается электромагнитная связь тяговых сетей двухпутного участка.

Правильность разработанного метода расчета по РАСТ-05К проверена для схем на рис. 1, и в рис. 2 тремя способами по предлагаемой методике в [11] с индуктивно развязанными сопротивлениями: ручным расчетом, по программе *Mathcad* и по модернизированной программе РАСТ-05К. Результаты расчета идентичны и доказывают правильность предложенного решения.

IV. Выводы

1. В существующей программе РАСТ-05К не учитывается составляющая потери напряжения от наведенного напряжения, что ведет к погрешности в расчетах. Предложены технические мероприятия по устранению указанного недостатка и доказали возможность вести по программе РАСТ-05К совместные расчеты систем тягового и внешнего электроснабжения с учетом электромагнитной связи тяговых сетей многопутного участка.

2. При расчете токов КЗ в программе РАСТ-05К следует схему замещения представить с индуктивно развязанными сопротивлениями тяговой сети и сопротивления рельсов ввести в цепь контактной сети. В качестве примера представлен расчет КЗ тяговой сети 25 кВ с взаимоиндуктивными связями по программе РАСТ-05К для расчета токов КЗ, подтверждающий возможность расчета тяговой сети с учетом наведенного напряжения.

3. Для расчета потерь напряжения следует произвести модернизацию программы РАСТ-05К с дополнением модели рельсовой цепи с параметрами $z'_{p,2}$ ($r'_{p,2}$, $x'_{p,2}$) для составляющей потери напряжения от наведенного напряжения.

© Герман Л.А., 2022

© Субханвердиев К.С., 2022

Поступила в редакцию 28.02.2022

Received 28.02.2022

Библиографический список

- [1] Герман Л.А. Схема замещения электрифицированного участка железной дороги переменного тока // Электричество. 1988. № 3. С. 34-35.
- [2] Герман Л.А. Формирование алгоритма совместного расчета систем тягового и внешнего электроснабжения // Электроника и электрооборудование транспорта. 2021. № 1. С. 6-11.
- [3] Герман Л.А., Попов Д.С., Кишкурно К.В. Программа совместного расчета систем тягового и внешнего электроснабжения РАСТ-05К, Свид. 2014612195 RU, заявл. 28.10.13; опубл. 20.03.14.
- [4] Герман Л.А., Кишкурно К.В. Программа расчета прогнозируемого режима тяговой сети переменного тока РАПР-П, Свид. 2014616186 RU, заявл. 18.03.14; опубл. 20.07.14.
- [5] Герман Л.А., Морозов Д.А. Расчет типовых задач тягового электроснабжения переменного тока на ЭВМ. М.: РОАТ, 2010. – 59 с.
- [6] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. Ч. 2. М.: УМЦ ЖДТ, 2021. – 208 с.
- [7] Марквардт Г.Г. Некоторые вопросы расчета системы однофазного энергоснабжения электрических железных дорог однофазного тока. М.: ВЗИИТ, 1962. – 75 с.

- [8] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
- [9] Фигурнов Е.П. Релейная защита. Ч. 2: Релейная защита устройств тягового электроснабжения железных дорог. М.: УМЦ ЖДТ: Транспортная книга, 2009. – 603 с.
- [10] Аржаниников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.
- [11] Сборник СТО РЖД. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Ч. 1-5. М.: ООО «Центр инноваций и Развития «Техинформ», 2019. – 304 с.

References

- [1] L.A. German, “Skhema zameshcheniya elektrificirovannogo uchastka zheleznoj dorogi peremennogo toka [Equivalent circuit of electrified section of AC railway]”, *Electricity*, no. 3, pp. 34-35, 1988 (in Russian).
- [2] L.A. German, “Formation of an integrated calculation of traction power supply systems and external power supply systems”, *Electronics and electrical equipment of transport*, no. 1, pp. 6-11, 2021 (in Russian).
- [3] L.A. German, D.S. Popov and K.V. Kishkurno, “Programma sovmestnogo rascheta sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya RAST-05K [The program for the joint calculation of traction and external power supply systems RAST-05K]”, Certificate RU 2014612195, Mar. 20, 2014 (in Russian).
- [4] L.A. German and K.V. Kishkurno, “Programma rascheta prognoziruемого rezhima tyagovoj seti peremennogo toka RAPR-P [The program for calculating the predicted mode of the AC traction network RAPR-P]”, Certificate RU 2014616186, Jul. 20, 2014 (in Russian).
- [5] L.A. German and D.A. Morozov, *Raschet tipovykh zadach tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka na EVM [Calculation of typical tasks of AC traction power supply on computer]*. Moscow: ROAT, 2010 (in Russian).
- [6] L.A. German, K.S. Subhanverdiev and V.L. German, *Avtomatizaciya elektrosnabzheniya tyagovoj seti peremennogo toka. [Automation of power supply of AC traction network]. Part 2*. Moscow: Training and methodological center for education in railway transport, 2021 (in Russian).
- [7] G.G. Markvardt, *Nekotorye voprosy rascheta sistemy odnofaznogo energosnabzheniya elektricheskikh zheleznyh dorog odnofaznogo toka [Some issues of calculation of the system of single-phase power supply of electric railways of single-phase current]*. Moscow: VZIIТ, 1962 (in Russian).
- [8] K.G. Markvardt, *Elektrosnabzhenie elektrificirovannyh zheleznyh dorog [Power supply of electrified railways]*. Moscow: Transport, 1982 (in Russian).
- [9] E.P. Figurnov, *Relejnaya zashchita. Ch. 2: Relejnaya zashchita ustrojstv tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznyh dorog [Relay protection. Part 2: Relay protection of railway traction power supply devices]*. Moscow: Training and Methodology Centre for Railway Transport: Transport book, 2009 (in Russian).

- [10] E.A. Arzhannikov, V.Yu. Lukoyanov and M.Sh. Misrikhanov, *Opređenje mesta korotkogo замыкания на высоковольтных линиях электропередачи [Determining the location of a short circuit on high-voltage power lines]*. Moscow: Energoatomizdat, 2003 (in Russian).
- [11] *Sbornik STO RZD. Zashchita sistem elektrosnabzheniya zheleznoj dorogi ot korotkih замыканий i peregruzki [Collection of organization standards of the Russian Railways. Protection of railway power supply systems from short circuits and overload]*. Parts 1-5. Moscow: ООО "Center for Innovation and Development "Techinform", 2019 (in Russian).

Приложение 1

($R_{пер} = 0,1 \text{ Ом}$)

Исходные данные:

Количество ветвей СВЭ: 6

Количество узлов: 6

Количество ветвей СТЭ: 7

Количество фиктивных узлов: 0

ЭДС: 28 кВ.

Данные о ветвях СВЭ:

Z1 0 +3j, Ом Нач. узел: 0 Кон. узел: 1

Z2 0 +3j, Ом Нач. узел: 0 Кон. узел: 2

Z3 0 +9999999999j, Ом Нач. узел: 0 Кон. узел: 3

Z4 0 +9999999999j, Ом Нач. узел: 0 Кон. узел: 4

Z5 0 +9999999999j, Ом Нач. узел: 0 Кон. узел: 5

Z6 0 +9999999999j, Ом Нач. узел: 0 Кон. узел: 6

Данные о ветвях СТЭ:

Zтс1 2,775 + 7,15j, Ом Нач. узел: 1а Кон. узел: 3а

Zтс2 0,116 + 0,544j, Ом Нач. узел: 3а Кон. узел: 4а

Zтс3 0,116 + 0,544j, Ом Нач. узел: 2а Кон. узел: 5а

Zтс4 4,075 + 7,3j, Ом Нач. узел: 4а Кон. узел: 5а

Zтс5 0,652 + 1,168j, Ом Нач. узел: 4а Кон. узел: 6а

Zтс6 3,423 + 6,132j, Ом Нач. узел: 5а Кон. узел: 6а

Zтс7 0,1 + 0j, Ом Нач. узел: 6а Кон. узел: p

Задающие токи:

Узел № 1

фаза А = 0 кА + 0°; фаза В = 0 кА + 0°; фаза С = 0 кА + 0°

Узел № 2

фаза А = 0 кА + 0°; фаза В = 0 кА + 0°; фаза С = 0 кА + 0°

Узел № 3

фаза А = 0 кА + 0°; фаза В = 0 кА + 0°; фаза С = 0 кА + 0°

Узел № 4

фаза А = 0 кА + 0°; фаза В = 0 кА + 0°; фаза С = 0 кА + 0°

Узел № 5

фаза А = 0 кА + 0°; фаза В = 0 кА + 0°; фаза С = 0 кА + 0°

Узел № 6

фаза А = 0 кА + 0°; фаза В = 0 кА + 0°; фаза С = 0 кА + 0°

Коэффициенты трансформации:

Узел № 1	$n = 1$
Узел № 2	$n = 1$
Узел № 3	$n = 1$
Узел № 4	$n = 1$
Узел № 5	$n = 1$
Узел № 6	$n = 1$

Данные расчета

Ток КЗ на участках:

I_{y1}	$0,455 - 1,686j$ кА	Модуль: 1,746 ($-74,911^\circ$) кА
I_{y2}	$0,455 - 1,686j$ кА	Модуль: 1,746 ($-74,911^\circ$) кА
I_{y3}	$0,595 - 2,544j$ кА	Модуль: 2,612 ($-76,841^\circ$) кА
I_{y4}	$-0,213 + 0,934j$ кА	Модуль: 0,958 ($+102,877^\circ$) кА
I_{y5}	$0,668 - 2,619j$ кА	Модуль: 2,703 ($-75,694^\circ$) кА
I_{y6}	$0,381 - 1,61j$ кА	Модуль: 1,655 ($-76,678^\circ$) кА
I_{y7}	$1,049 - 4,23j$ кА	Модуль: 4,358 ($-76,068^\circ$) кА

Напряжения в узлах:

Узел № 1
фаза А = 18,09 ($-8,67^\circ$), кВ; фаза В = 24,57 ($+8,66^\circ$), кВ; фаза С = 27,13 ($-10,75^\circ$), кВ.

Узел № 2

фаза А = 13,23 ($-15,65^\circ$), кВ; фаза В = 23,35 ($+14,17^\circ$), кВ; фаза С = 26,8 ($-16,25^\circ$), кВ.

Узел № 3

фаза А = 4,75 ($-15,87^\circ$), кВ; фаза В = 23,71 ($+24,47^\circ$), кВ; фаза С = 25 ($-24,76^\circ$), кВ.

Узел № 4

фаза А = 3,84 ($-20,57^\circ$), кВ; фаза В = 23,64 ($+25,63^\circ$), кВ; фаза С = 24,99 ($-25,87^\circ$), кВ.

Узел № 5

фаза А = 11,84 ($-17,68^\circ$), кВ; фаза В = 23,15 ($+15,89^\circ$), кВ; фаза С = 26,65 ($-17,78^\circ$), кВ.

Узел № 6

фаза А = 0,44 ($-76,07^\circ$), кВ; фаза В = 24,04 ($+29,87^\circ$), кВ; фаза С = 24,46 ($-29,88^\circ$), кВ.

Потери мощности от КЗ в СВЭ: $0 + 59,24j$, МВА.

Потери мощности в СТЭ от тока КЗ: $29,379 + 59,19j$, МВА.

Суммарные потери мощности: $29,379 + 118,43j$, МВ.

Приложение 2

($R_{пер} = 8$ Ом)

Исходные данные:

Количество ветвей СВЭ: 6

Количество узлов: 6

Количество ветвей СТЭ: 7

Количество фиктивных узлов: 0

ЭДС: 28 кВ.

Данные о ветвях СВЭ:

Z1 $0 + 3j$, Ом Нач. узел: 0 Кон. узел: 1

Z2 $0 + 3j$, Ом Нач. узел: 0 Кон. узел: 2

Z3 $0 + 9999999999j$, Ом Нач. узел: 0 Кон. узел: 3

Z4 $0 + 9999999999j$, Ом Нач. узел: 0 Кон. узел: 4

Z5 0 + 9999999999j, Ом	Нач. узел: 0	Кон. узел: 5
Z6 0 + 9999999999j, Ом	Нач. узел: 0	Кон. узел: 6
Данные о ветвях СТЭ:		
Zтс1 2,775 + 7,15j, Ом	Нач. узел: 1а	Кон. узел: 3а
Zтс2 0,116 + 0,544j, Ом	Нач. узел: 3а	Кон. узел: 4а
Zтс3 0,116 + 0,544j, Ом	Нач. узел: 2а	Кон. узел: 5а
Zтс4 4,075 + 7,3j, Ом	Нач. узел: 4а	Кон. узел: 5а
Zтс5 0,652 + 1,168j, Ом	Нач. узел: 4а	Кон. узел: 6а
Zтс6 3,423 + 6,132j, Ом	Нач. узел: 5а	Кон. узел: 6а
Zтс7 8 + 0j, Ом	Нач. узел: 6а	Кон. узел: р

Задающие токи:

Узел № 1

фаза А = 0 кА + 0°; фаза В = 0 кА + 0°; фаза С = 0 кА + 0°

Узел № 2

фаза А = 0 кА + 0°; фаза В = 0 кА + 0°; фаза С = 0 кА + 0°

Узел № 3

фаза А = 0 кА + 0°; фаза В = 0 кА + 0°; фаза С = 0 кА + 0°

Узел № 4

фаза А = 0 кА + 0°; фаза В = 0 кА + 0°; фаза С = 0 кА + 0°

Узел № 5

фаза А = 0 кА + 0°; фаза В = 0 кА + 0°; фаза С = 0 кА + 0°

Узел № 6

фаза А = 0 кА + 0°; фаза В = 0 кА + 0°; фаза С = 0 кА + 0°

Коэффициенты трансформации:

Узел № 1 $n = 1$

Узел № 2 $n = 1$

Узел № 3 $n = 1$

Узел № 4 $n = 1$

Узел № 5 $n = 1$

Узел № 6 $n = 1$

Данные расчета

Токи КЗ на участках:

I_{y1}	0,838 – 0,529j кА	Модуль: 0,991 (–32,273°) кА
I_{y2}	0,838 – 0,529j кА	Модуль: 0,991 (–32,273°) кА
I_{y3}	1,226 – 0,834j кА	Модуль: 1,483 (–34,203°) кА
I_{y4}	–0,448 + 0,308j кА	Модуль: 0,544 (+145,516°) кА
I_{y5}	1,286 – 0,837j кА	Модуль: 1,534 (–33,056°) кА
I_{y6}	0,778 – 0,526j кА	Модуль: 0,939 (–34,04°) кА
I_{y7}	2,064 – 1,363j кА	Модуль: 2,474 (–33,43°) кА

Напряжения в узлах:

Узел № 1

фаза А = 25,33 (–11,45°), кВ; фаза В = 25,03 (+0,27°), кВ; фаза С = 29,5 (–5,12°), кВ.

Узел № 2

фаза А = 24,15 (–17,74°), кВ; фаза В = 23,57 (+0,79°), кВ; фаза С = 30,2 (–7,62°), кВ.

Узел № 3

фаза А = 21,01 (–27,04°), кВ; фаза В = 21,61 (+4,33°), кВ; фаза С = 30,5 (–12,13°), кВ.

Узел № 4

фаза А = 20,85 (-28,48°), кВ; фаза В = 21,34 (+4,57°), кВ; фаза С = 30,63 (-12,59°), кВ.

Узел № 5

фаза А = 23,76 (-19,49°), кВ; фаза В = 23,17 (+1,09°), кВ; фаза С = 30,36 (-8,35°), кВ.

Узел № 6

фаза А = 19,79 (-33,43°), кВ; фаза В = 20,53 (+6,29°), кВ; фаза С = 30,83 (-14,46°), кВ.

Потери мощности от тока КЗ в СВЭ: 0 +19,086j, МВА.

Потери мощности в СТЭ от тока КЗ: 57,802 + 19,07j, МВА.

Суммарные потери мощности 57,802 + 38,156j, МВА.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Герман Леонид Абрамович, доктор технических наук, профессор филиала Самарского государственного университета путей сообщения в Н. Новгороде, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Leonid A. German, D. Sci. (Eng.), professor of the Branch of the Samara State University of Railway Transport in N. Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Субханвердиев Камилль 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

УДК 621.311.42

DOI 10.46960/2658-6754_2022_2_94

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ КОМПЛЕКТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ 6-10/0,4 кВ

Н.Л. Новиков

АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Москва, Россия

e-mail: novikov_nl@ntc-power.ru

Р.Б. Жалилов

Бухарский инженерно-технологический институт

Бухара, Узбекистан

ORCID: 0000-0002-6112-490X e-mail: zhalilov.rashid@mail.ru

А.Н. Новиков

НТЦ Энергобезопасность

Москва, Россия

e-mail: novikov@energo365.ru

Статья посвящена исследованию и внедрению современных цифровых технологий в электротехнических комплексах отраслей промышленности для повышения их надежности. На основе перспективных информационных технологий предложена архитектура систем управления нового поколения комплектных трансформаторных подстанций 6-10/0,4 кВ. На основе результатов исследования на базе современных систем автоматизации разработана энергоэкономичная микропроцессорная система автоматического управления режимом работы комплектных трансформаторных подстанций напряжением 6-10/0,4 кВ. В дальнейшем предложенная система используется для создания серверов систем управления реальным временем электроустановок потребителей.

Ключевые слова: комплектная автоматическая трансформаторная подстанция, программируемый логический контроллер, система управления реальным временем, телекоммуникационные технологии, цифровые технологии.

Для цитирования: Новиков Н.Л., Жалилов Р.Б., Новиков А.Н. Разработка систем управления реальным временем комплектных трансформаторных подстанций 6-10/0,4 кВ // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 2. С. 94-110. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_94

DEVELOPMENT OF REAL-TIME CONTROL SYSTEM FOR COMPLETE TRANSFORMER SUBSTATIONS 6-10/0.4 kV

N.L. Novikov

JSC «NTC FGC UES»

Moscow, Russia

e-mail: novikov_nl@ntc-power.ru

R.B. Zhalilov

Bukhara Engineering Technology Institute

Bukhara, Uzbekistan

ORCID: 0000-0002-6112-490X e-mail: zhalilov.rashid@mail.ru

A.N. Novikov

STC Energobezопасnost

Moscow, Russia

e-mail: novikov@energo365.ru

Abstract. The article is devoted to the research and implementation of modern digital technologies in electrical complexes of industries in order to improve their reliability. Based on advanced information technologies, the architecture of control systems of a new generation of complete transformer substations 6-10/0.4 kV is proposed. As a result of research on the basis of modern automation systems, an energy-saving microprocessor-based system for automatic control of the operation mode of complete transformer substations with a voltage of 6-10/0.4 kV was developed, which later serves to create servers for real-time control systems for electrical installations of consumers.

Keywords: complete automatic transformer substation, digital technology, programmable logic controller, real-time control systems, SCADA, telecommunication technologies.

For citation: N.L. Novikov, R.B. Zhalilov and A.N. Novikov, “Development of real-time control systems for complete transformer substations 6-10/0.4 kV”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 94-110, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_94

I. Введение

Широкое внедрение в процессе развития науки, экономики, техники, социальной сферы комплекса информационных технологий и коммуникаций – отличительная черта современного социального и экономического развития. В мировой практике в последние годы наиболее часто наблюдается ориентация на создание и использование единого информационно-коммуникационного пространства (ЕИКП) [1-6].

Качество и надежность процессов производства, передачи и распределения электроэнергии (ЭЭ) повышается коренным образом внедрением систем автоматизации и диспетчерского управления на современной цифровой технике. Системы автоматизации, микропроцессорных средств релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗА) энергетических объектов обеспечивают экономический эффект за счет предотвращения аварийных ситуаций и минимизация ущерба в случае их возникновения и оптимизации режимов передачи и распределения энергии.

Из всего множества перспективных информационных технологий, определяющих в значительной степени системы управления нового поколения, могут быть выделены базовые технологии. В [1, 3-14] приведен анализ перспективных телекоммуникационных технологий.

II. Материалы и методы

Дальнейшей модификацией локальных сетей на разделяемой среде стали локальные коммутируемые сети (ЛКС) комитета *IEEE 802* являющиеся, с научно-техническим прогрессом в развитии средств телекоммуникационных систем (ТКС) [3, 4, 6-9, 15-18]. Благодаря указанным свойствам ЛКС стали постепенно вытеснять сети на разделяемой среде, сохранив при этом в своей основе технологию *Ethernet*. К таким сетям, в настоящее время, относятся сети стандартов *Fast Ethernet* (скорость 100 Мбит/с), *Gigabit Ethernet* (1 Гбит/с), *10G Ethernet* (10 Гбит/с), а также находящиеся в стадии разработки *40G Ethernet* (40 Гбит/с) и *100G Ethernet* (100 Гбит/с). При этом со стандарта *10G Ethernet* перестал использоваться вариант построения сети с разделяемой средой [3, 4, 6, 8, 9, 15].

В настоящее время технология сетей *Fast Ethernet* основывается на стандарте *IEEE 802.3u*, являющемся дополнением стандарта *IEEE 802.3*, т.е. сохраняется согласованность с сетями *Ethernet (CSMA/CD)* со скоростью передачи информации 10 Мбит/с. Стандарт *Fast Ethernet* использует протоколы физического уровня с тремя линиями связи:

- оптоволоконный кабель с двумя волокнами (протокол *100Base-FX*);
- кабель из двух витых пар, как правило, категории 5 (протокол *100Base-TX*);
- кабель из четырех витых пар категорий 3, 4 и 5 (протокол *100Base-T4*).

Скорость передачи информации в этих сетях составляет 100 Мбит/с.

Сети *Gigabit Ethernet*, *10G Ethernet*, основанные на стандарте *IEEE 802.3u*, согласуются со спецификациями сетей *Ethernet (CSMA/CD)* и *Fast Ethernet*. Скорость передачи информации в сети *Gigabit Ethernet* составляет 1000 Мбит/с, а в сети *10G Ethernet* – 10000 Мбит/с.

Сети *Fast Ethernet*, *Gigabit Ethernet* и *10G Ethernet* используются в качестве высокоскоростных магистральных сетей, способных поддерживать трафик с большим объемом передаваемой информации. Сравнение этих стандартов *RS-232* и *RS-485* приводится в [3, 4, 6-9, 15-17].

Повышения надежности передачи информации в беспроводной сети обеспечивает программно-управляемое микропроцессорное устройство - современный модем (интеллектуальный модем), которое выполняет, помимо функции «центрирования по несущей», функции кодирования сообщения специальными кодами (например, циклическими кодами), скремблирования, уплотнения канала связи и т. п. [3, 4, 6-11, 15]. Модем используется в качестве устройств *DCE* (АКД) по следующим причинам:

- увеличивается дальность передачи;
- повышается достоверность передачи при использовании помехоустойчивых типов модуляции;
- имеется возможность увеличения скорости передачи сообщений за счет «уплотнения канала связи»;
- повышается эффективность излучения сигнала при передаче сообщений по радиоканалу.

Существуют многочисленные технические реализации модемов разных фирм-производителей, обладающих теми или иными необходимыми функциями. При этом общепринятой классификации модемов в настоящее время не существует, однако можно сформировать некоторую обобщенную структурную схему современного интеллектуального модема (рис. 1).

В состав интеллектуального модема входят следующие устройства:

- 1) ПЗУ (постоянное запоминающее устройство) – память, содержащая программы управления модемом. Управление модемом ведется командами с *DTE* (например: АТ-командами);
- 2) ППЗУ (программируемое постоянное запоминающее устройство) – память, сохраняющая при отключении электроэнергии рабочие уставки модема;
- 3) ОЗУ (оперативное запоминающее устройство) – память, в которой хранятся данные и промежуточные вычисления;
- 4) универсальный процессор, который управляет режимами работы отдельных частей модема и выполняет команды с *DTE*;
- 5) цифровой сигнальный процессор, который осуществляет кодирование сообщений специальными кодами (например, циклическими кодами) и скремблирование;
- 6) модемный процессор, который реализует один из возможных видов протоколов модуляции, т.е. осуществляется модуляция цифрового сообщения и взаимодействие рассматриваемого модема с модемом другого терминала.

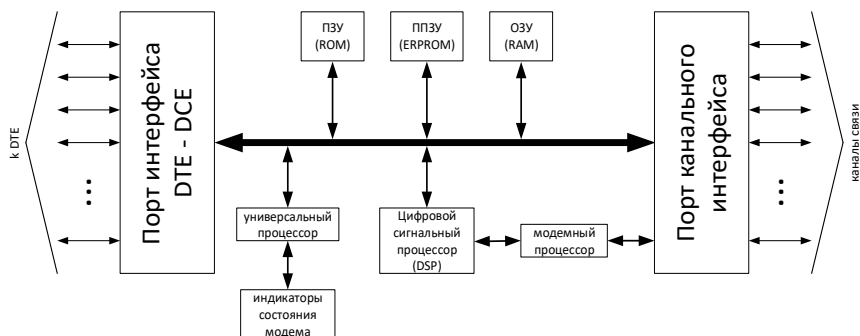


Рис. 1. Структурная схема интеллектуального модема

Fig. 1. Block diagram of an intelligent modem

III. Локальные сети комитета *IEEE 802*

Локальные сети, стандартизированные комитетом 802 института инженеров по электротехнике и электронике США (*IEEE*), представляют собой семейство локальных сетей, построенных на основе дейтаграммных технологий передачи данных. Их основу составляют сети *Ethernet*, построенные на отдельных стандартных технологиях, таких как *IEEE 802.3*, *IEEE 802.3u* и т.п., хотя используются и иные сети, стандартизированные комитетом *IEEE 802* [3, 4, 6-9, 15-17]. *WLAN*, в основном, используются в составных локальных сетях, где магистралью являются скоростные сети *Ethernet*, например в АСУ ТП нефтегазовой отрасли. Пример такой сети приведен на рис. 2 и рис. 3.

Скорость передачи информации в *WLAN* существенно зависит от диапазона частот и выбранного варианта спецификации физического уровня стандарта *IEEE 802.11*.

В настоящее время существуют три современных варианта спецификаций физического уровня: *IEEE 802.11a*, *IEEE 802.11b* и *IEEE 802.11g*. Спецификация *IEEE 802.11a* использует диапазон 2,4 ГГц с шириной полосы около 300 МГц. Эта полоса частот разбита на 48 и более диапазонов (в зависимости от правила распределения диапазонов, принятых конкретной страной). Скорость передачи информации по этой спецификации может достигать до 54 Мбит/с.

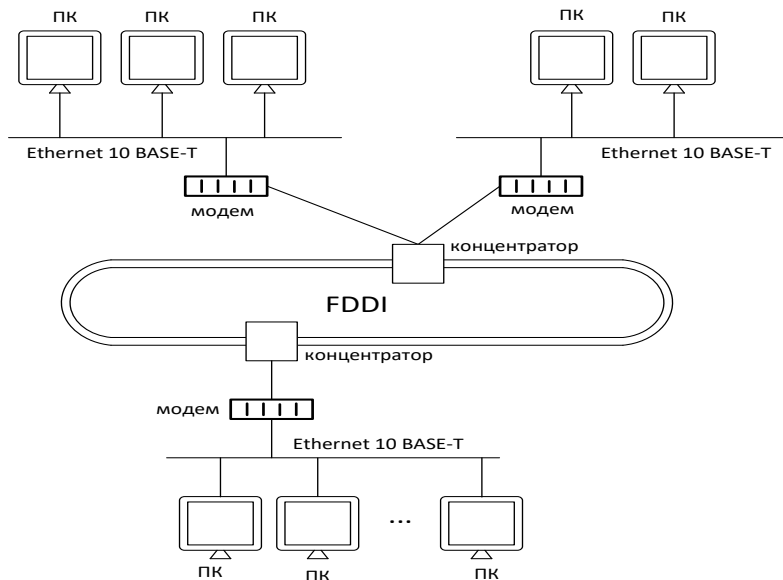


Рис. 2. ТКС с магистральной информационной подсетью *FDDI*

Fig. 2. Telecommunications system with the *FDDI* backbone information subnet

Спецификация *IEEE 802.11b* использует диапазон 5 ГГц с шириной полосы около 80 МГц. Эта полоса частот разбита на 14 диапазонов (каналов), каждый из которых отстоит от соседнего диапазона на 5 МГц. Скорость передачи информации по этой спецификации может достигать 11 Мбит/с.

Спецификация *IEEE 802.11g* использует диапазон 2,4 ГГц, при этом обеспечивается скорость передачи до 54 Мбит/с. Классификация беспроводных сетей комитета *IEEE 802* и их возможностей приведена на рис. 4. Понятно, что в настоящее время беспроводные линии связи применяются там, где невозможно или нецелесообразно установить проводные или оптоволоконные линии связи.

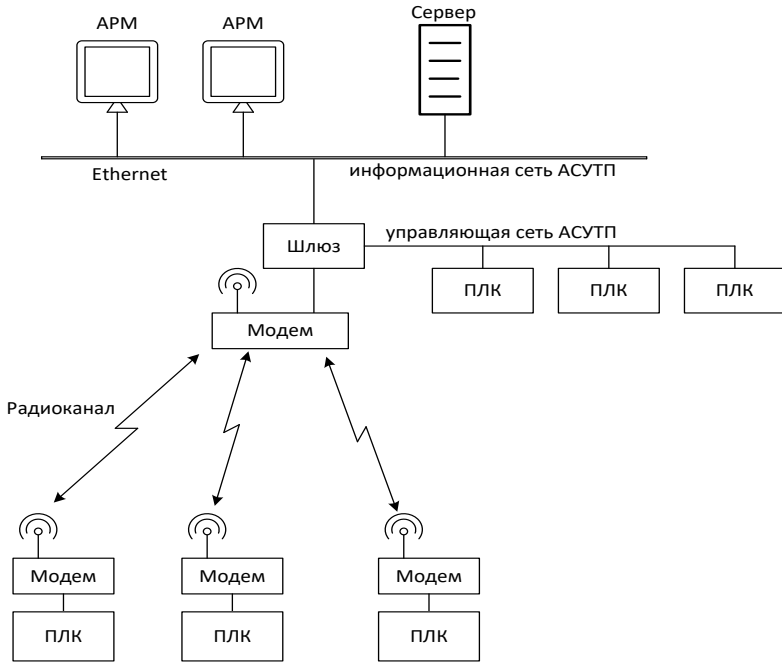


Рис. 3. Пример ТКС с подсетями WLAN

Fig. 3. Example of a telecommunications system with WLAN subnets

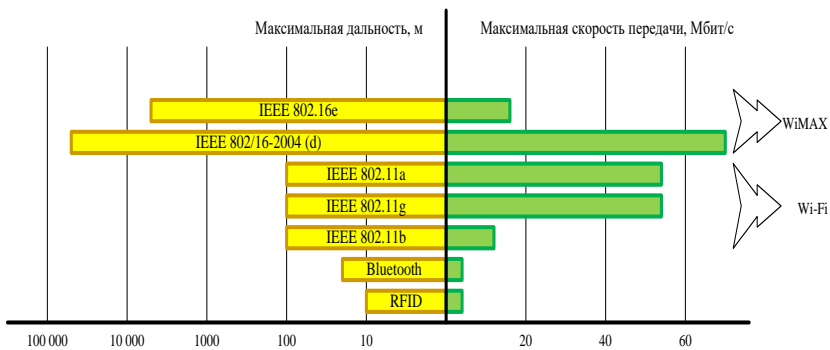


Рис. 4. Классификация беспроводных сетей

Fig. 4. Classification of wireless network

IV. Система управления реального времени КАТП 6-10/0,4 кВ

Рассмотренные выше элементы ТКС реализованы в прикладном проекте ОТ-А3-12 «Разработка энергоэкономичной микропроцессорной системы автоматизации управления режима работы комплектных трансформаторных подстанций напряжением 6-10/0,4 кВ». Проект относится к исследованию автоматизации комплектных трансформаторных подстанций напряжением 6-10/0,4 кВ. В настоящее время проведены и продолжаются исследования в этой области, разработаны различные схемные решения.

Для комплектных автоматических трансформаторных подстанций (КАТП) разработано распределительное устройство (РУ) 0,4 кВ, отличительной особенностью которого является современный дизайн, за счет наличия портов и применения стандартного протокола – открытость для систем АСУ, в части защиты расширенные возможности, гибкое аппаратно-программное обеспечение, позволяющее реализовать гибкие технико-экономические решения для электроснабжения потребителей любой категории. Функции автоматики, РЗА, дистанционного или местного управления, регистрации, измерения, контроля кривой напряжения сигнализации, диагностики выключателя, а также необходимые блокировки реализованы в различных присоединениях КАТП.

В КАТП, наряду с вышеперечисленными функциями, реализованы системы автоматики КАТП на базе ПЛК. Это обеспечивает расширение его функциональных возможностей, повышая тем самым надежность устройства и улучшая его эксплуатационные качества. ПЛК имеют ряд особенностей:

- информация в ПЛК представляется через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) в виде числовых кодов. Обмен информацией между узлами ПЛК осуществляется с помощью шин, которые различаются по функциям: шина пересылки данных (ШД), шина адреса (ША), шина передачи команд управления (ШУ);
- обмен информацией между ПЛК и другими узлами КАТП осуществляется с помощью линий связи. В КАТП в качестве линий связи используются контрольные кабели.

Вышеперечисленные особенности ПЛК позволяют достигнуть определенные преимущества при автоматизации работы и управлении режимом КТП по сравнению с выполнением защиты и автоматики на микропроцессорных блоках типа БМР3-0,4 в 2КТП.

В РУ-0,4 кВ реализован алгоритм автоматики КАТП (рис. 5).

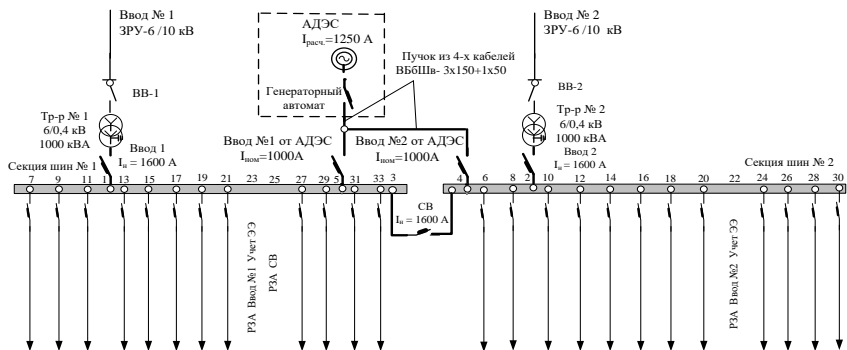


Рис. 5. Однолинейная принципиальная схема КАТП

Fig. 5. Schematic diagram of complete automatic transformer substations

На секционном выключателе (СВ) выполнен автоматический ввод резерва (АВР): нормальный режим – включены оба вводных выключателя от трансформаторов, СВ отключен.

Переключатель «автоматического обратного перехода», имеющий два положения: «Авт.» и «Ручн.» РУ-0,4 кВ КАТП обеспечить возможность, при потере основного питания, как автоматизации перехода на резервное или аварийное питание и при восстановлении напряжения автоматический возврат на питание от основных источников, так и управления вручную, позволяет привести систему автоматики КАТП в соответствие с требованиями Правил технической эксплуатации электроустановок (ПТЭ). Тем самым расширяются функциональные возможности, эксплуатационные качества и повышается надежность.

Алгоритм обратного перехода

С заданной уставкой времени (1-30 мин), при появлении напряжения на одном из вводов, формируется сигнал нормального останова АДЕС. При этом отключается генераторный выключатель АДЕС, по факту его отключения, наличия напряжения на вводе до вводного выключателя одной из секций шин (СШ), факту отсутствия напряжения на СШ, факту отключенного состояния вводного выключателя смежной секции, вводной выключатель той СШ, на вводе которой появилось напряжение, включается без выдержки времени.

Когда появляется напряжение на другом вводе, распланный выше процесс выполняется для второго ввода и в исходное положение возвращается схема АВР. Расширяются функциональные возможности, повышаются надежность и эксплуатационные качества КАТП за счет введения в систему автоматики модуля связи (*communication Bus*) COM, который служит для

передачи данных, что позволяет обеспечить при создании АСУ Энерго предприятия возможность передать сигналы от информационно-управляющей системы верхнего уровня на секции шин КАТП.

Элементная база

Основными элементами разработанной системы автоматизации управления режима работы комплектных трансформаторных подстанций напряжением 6-10/0,4 кВ являются:

- микроконтроллер *ARDUINO UNO*;
- релейный модуль *TONGLING JQC-3FF-S-Z* с техническими характеристиками – 5 VDC, 10A 250 VAC, 15A 125 VAC, 10A 250 VAC;
- реле 12 В DC *Omron MY4N-j*;
- реле 220 В AC *Omron MY4N-j*;
- блок питания 5 В DC/AC *adaptor*, модель ХС 313 с напряжением 5В при токе до 2А;
- блок питания 12 В DC *RS-300/120-S325 12V/3A* (аналоги: *AD PV16, P30B-3P2J*);
- лампы сигнальные АРТ *AD 16-220 D/S31 AC 220 V 20 mA*.

На рис. 6 приведена схема разработанной системы автоматизации.

Вся аппаратура системы размещаются в металлическом шкафу размерами 50 x 75 см. Для защиты элементов на входе установки установлен автоматический выключатель *IEC* марки *C* на 25 А. Автоматический выключатель, реле 12 В DC *Omron MY4N-j*, реле 220 В AC *Omron MY4N-j* устанавливаются на *Din* рейке с соблюдением правил технологии монтажа.

Блоки питания и микроконтроллер *ARDUINO UNO* размещены на дно шкафа располагаются удобным для монтажа цепей управления. Лампы сигнальные АРТ *AD 16-220 D/S31 AC 220 V 20 mA* установлены на входной двери шкафа для наглядности и удобства наблюдения за работой системы, а также удобства и легкости монтажа.

V. Интеграция КАТП в управление и контроль электропотреблением системы диспетчеризации

Автоматические выключатели *Masterpact NT H1* интегрируются в систему управления электропотреблением, диспетчеризации, накопления информации о нагрузках секций шин КТП, контроля за электропотреблением с помощью дополнительной функции передачи данных (*communication Bus*) *SOM*, реализованной в АВ *Masterpact NT* ячеек секционной ввода от трансформатора и от резервного источника. Для этой цели в этих выкатных аппаратах устанавливается модуль связи, поставляемым вместе с группой датчиков (микроконтакты *OF, SDE, PF, CH*); в шасси устанавливаемым комплект связи с электромагнитами управления *XF* и *MX* – модулем связи, который поставляемым вместе с группой датчиков (контакты *CE, CD, CT*).

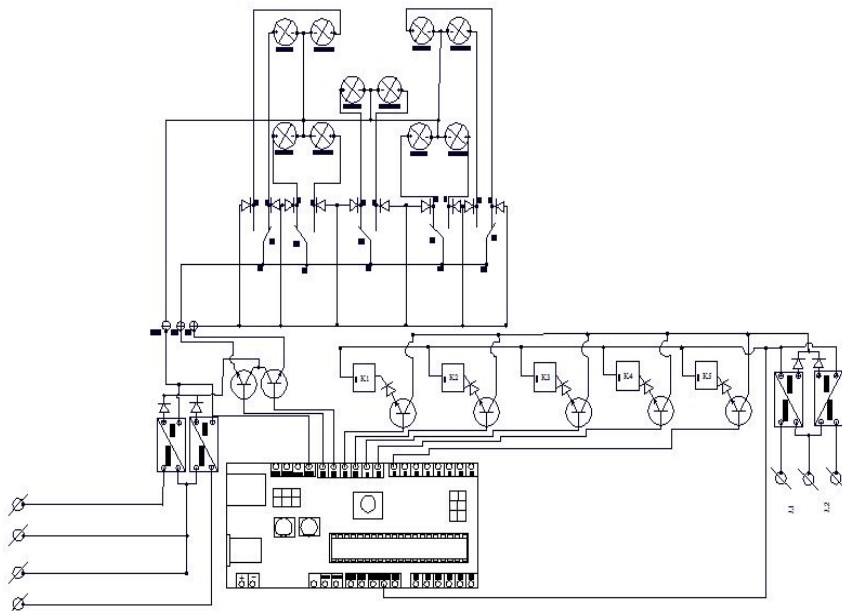


Рис. 6. Схема системы автоматизации управления режима работы КТП напряжением 6-10/0,4 кВ

Fig. 6. Diagram of the automation control system for the operation of a 6-10/0.4 kV complete transformer substations

Дистанционно (*Batibus*) или при помощи клавиатуры блока контроля и управления *Micrologic (Modbus)* присваивается каждому установленному аппарату адрес.

Таким образом, при создании АСУ-Энерго предприятия, возможно от ИУС верхнего уровня, например, от мини ЭВМ ДП предприятия, передать в верхний уровень данных сигнализации, регистрации, контроля гармоник в кривой напряжения, автоматики, измерения, управление установленными на питающий подстанции АВ, либо через ПЛК, либо минуя его другую необходимую информацию в различных присоединениях КТП.

VI. Расчет показателей надежности схем электроснабжения с разработанной системой автоматизации

Проведем расчет надежности КТП [7, 12-14, 19]. Определим вероятность бесперебойного электроснабжения любого из потребителей этой системы. Для удобства расчета схему рис. 5 представим в виде рис. 7.

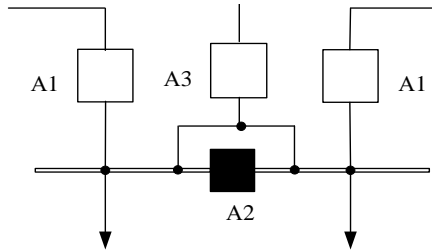


Рис. 7. Питание потребителей по схеме с АВР на СВ и реализацией 3-го независимого источника с автоматическим обратным переходом

Fig. 7. Supply of consumers according to the scheme with automatic transfer switch on section switch and the implementation of the 3rd independent source with automatic reverse transition

При отсутствии отказов выключателей двух основных вводов отказ системы происходит при совпадении отказа одного из источников с аварийным простоем другого, т.е.:

$$Q(S|A_1, A_2) = 3 \cdot (1 - 0,85)(1 - 0,99) = 0,0045. \quad (1)$$

Условная вероятность отказа 3-го независимого источника:

$$Q(S|A_1, A_2, \bar{A}_3) = 2 \cdot (0,5 \cdot 0,9) \cdot 0,01 + 3 \cdot 0,01 = 0,039. \quad (2)$$

Вероятность отказа системы с резервированием замещением определяется по формуле полной вероятности:

$$Q_c = Q(S|A_1, A_2)P(A_1)P(A_2) + Q(S|\bar{A}_1, A_2)Q(A_1)P(A_2) + \\ + Q(S|A_1, \bar{A}_2)P(A_1)Q(A_2) + Q(S|\bar{A}_1, \bar{A}_2)Q(A_1)Q(A_2) - Q(S|A_1, A_2, \bar{A}_3), \quad (3)$$

где $Q(S|A_1, A_2)$ – условная вероятность отказа системы при отсутствии отказов аппаратов; $Q(S|\bar{A}_1, A_2)$ – то же при отказе в отключении отказавшего элемента; $Q(S|A_1, \bar{A}_2)$ – то же при отказе во включении резервного; $Q(S|\bar{A}_1, \bar{A}_2)$ – то же при совпадении отказа в отключении с отказом во вклю-

чений; $Q(S | A_1 A_2 \bar{A}_3)$ – условная вероятность отказа 3-го независимого источника; $P(A_1)$, $Q(A_1)$ – вероятность отсутствия отказа и отказа в отключении; $P(A_2)$, $Q(A_2)$ – вероятность отсутствия отказа и отказа во включении.

$$Q_c = 0,0045 \cdot 0,85 \cdot 0,99 + 0,5 \cdot 0,1 \cdot 0,99 + 0,5 \cdot 0,9 \cdot 0,01 + 0,5 \cdot 0,9 \cdot 0,01 = 0,003787 + 0,0495 + 0,0045 + 0,0045 - 0,039 = 0,06229 - 0,039 = 0,02329.$$

Вероятность, которую требуется определить:

$$P_c = 1 - 0,02329 = 0,97671. \quad (4)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1.
Сравнение показателей надежности вариантов схем электроснабжения

Table 1.
Comparison of reliability indicators of options for power supply schemes

Расчетные показатели	Существующие варианты схем		Разработанная с АВР на СВ и реализацией 3-го независимого источника с автоматическим обратным переходом
	с АВР на одном из вводов	с АВР на СВ	
$Q(A_1)$	0,05	0,1	0,15
$P(A_1)$	0,95	0,9	0,85
$Q(A_2)$	0,01	0,01	0,01
$P(A_2)$	0,99	0,99	0,99
$Q(S \bar{A}_1 A_2)$	1	0,5	0,5
$Q(S \bar{A}_1 \bar{A}_2)$	1	0,5	0,5
$Q(S A_1 \bar{A}_2)$	1	0,5	0,5
$Q(S A_1 A_2)$	0,001	0,002	0,003
$Q(S A_1 A_2 \bar{A}_3)$	–	–	0,039
Q_c	0,06044	0,05628	0,02329
P_c	0,93956	0,94372	0,97671

VII. Выводы

1. Архитектура систем управления нового поколения определяется в значительной степени перспективными информационными технологиями.

2. В КАТП РУ-0,4 кВ, оснащенные ПЛК, обеспечивают комплексную защиту и управление подстанций на современном уровне: запись и передачу осциллограмм, контроль положения первичного оборудования, сигнализации, автоматическое управление с удаленных диспетчерских пунктов по месту или измерение.

3. Серверы систем управления реального времени (SCADA), выполняют сбор и обработку данных о работе РЗА; связей новых комплексов контроля и управления интегрированной системы, систем отображения информации - на рабочих местах оперативного персонала и персонала служб РЗА.

© Новиков Н.Л., 2022

© Жалилов Р.Б., 2022

© Новиков А.Н., 2022

Поступила в редакцию 28.03.2022

Received 28.03.2022

Библиографический список

- [1] Путин: будущее российской цивилизации зависит от успеха в развитии высоких технологий // ТАСС. Наука, 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/8493647> (дата обращения: 18.03.2020).
- [2] Тюменева Н.В. Стратегия развития информационного общества и информационно-коммуникативной культуры в Российской Федерации // Известия Саратовского Университета. Новая серия. Серия: Экономика. Управление. Право. 2020. Т. 20. Вып. 3. С. 339–345. DOI: 10.18500/1994-2540-2020-20-3-339-345
- [3] Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. 5-е изд. СПб.: Питер, 2016. – 992 с.
- [4] Aslonov Q.Z., Zhalilov R.B., Mukhamadieva Z.B., Safarov A.B., Mamedov R.A. Efficient and convenient application to determine the functions and analysis of the reliability of the device // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJTEE). 2019. № 9 (2). С. 1804–1809. DOI: 10.35940/ijtee.B7323.129219
- [5] Latipov S.T., G.N. Aslanova, Nematov L.A., Akhmedov A.A., Charieva M.R. Calculation of reliability indicators of power supply systems of consumers // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 139. № 01037. DOI: 10.1051/e3sconf/201913901037
- [6] Карманов А.В., Орлова К.П. Принципы построения телекоммуникационных систем и телекоммуникационные технологии. М.: ИЦ РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2015. – 80 с.
- [7] Jalilov R., Latipov S., Aslonov Q., Choriyev A., Charieva M. To the question of the development of servers of real-time management systems of electrical engineering complexes on the basis of modern automation systems // in proc. International Scientific and Practical Conference «Information Technologies and Intelligent Decision-Making Systems» (ITIDMS 2021), Jan. 20, 2021, Moscow, Russia. CEUR-WS. 2021. Vol. 2843.

- [8] Беккер В.Ф. Технические средства автоматизации. Интерфейсы и микропроцессорные средства. М.: РИОР, ИНФРА-М, 2015. – 71 с.
- [9] Белушкин С.Д., Демин О.В., Климанов В.П., Сутягин М.В. Методы и средства обеспечения высокоскоростного обмена информацией в центральном сегменте телекоммуникационной образовательной сети // Индустрия образования. 2002. Вып. 2. С. 120–124.
- [10] Аслонов К.З. Создание модели беспроводной системы управления на базе платы Arduino Uno с технологией Bluetooth 2.0 // Развитие науки и технологий. 2020. № 2. С. 125-131.
- [11] Жалилов Р.Б., Аслонов К.З., Рахматова У.д, Атоев Ф.С., Сайфиев Х.О. Программа для цифрового беспроводного управления блоком приема и передачи информации систем телекоммуникации, Свид. DGU 8408, заявл. 28.05.20; опубл. 29.07.20.
- [12] Жалилов Р.Б., Латипов С.Т. Интеллектуализация систем энергетики с использованием информационных и коммуникационных цифровых технологий // Мат. респ. науч.-техн. конф. «Инновационное развитие электросетевых предприятий в условиях цифровизации отраслей экономики Узбекистана», 8 Сент., 2021, Ташкент, Узбекистан. Ташкент: ТашГТУ, 2021. С. 132- 138.
- [13] Жалилов Р.Б. Повышение надежности систем электроснабжения в условиях цифровой трансформации // Проблемы энерго-ресурсосбережения. 2021. Спец. выпуск. С. 84-88.
- [14] Ershov M.S., Blyuk V.V., Zhalilov R.B. An express methodology for calculating the reliability of power supply systems with autonomous power sources // Energy Systems Research. 2020. vol. 3. no. 2. pp. 13-18. DOI: 10.38028/esr.2020.02.002
- [15] Волошенко М.В. Информационная безопасность, независимость инфокоммуникационного пространства России [Электронный ресурс]. www.sgkuper.ru/documents/inf_security.doc (дата обращения 25.04.2020).
- [16] Сутягин М.В. Обеспечение надежности автоматизированных информационных систем на основе сетевой кластеризации серверов: автореф. дис. канд. техн. наук, МГТУ «СТАНКИН», Москва, 2004.
- [17] Титов А.В. Модели и методы оценки надежности специализированного программного обеспечения систем обработки информации: автореф. дис. канд. техн. наук, СПИИРАН, Санкт-Петербург, 2013.
- [18] Jalilov R.B., Latipov S.T., Aslanova G.N., Akhmedov A.A., Shayimova S.P. Key directions of development of measures to provide the reliability of electrical power systems // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 139. № 01001. DOI: 10.1051/e3sconf/201913901001
- [19] Жалилов Р.Б. Комплектная автоматическая трансформаторная подстанция, Пат. FAP 01303, заявл. 09.04.17; опубл. 26.04.18.

References

- [1] “Putin: budushchee rossijskoj civilizacii zavisit ot uspekha v razvitii vysokih tekhnologij [Putin: the future of Russian civilization depends on success in the development of high technologies]”, *TASS. Nauka [TASS. The science]*. [Online]. Available at: <https://nauka.tass.ru/nauka/8493647> [Accessed: March 18, 2020] (in Russian).

- [2] N.V. Tyumeneva, “The role of the Russian state in shaping the information society development strategy”, *Izvestiya of Saratov University. Economics. Management. Law*, vol. 20, no. 3, pp. 339-345, 2020. DOI: 10.18500/1994-2540-2020-20-3-339-345 (in Russian).
- [3] V. Oliner and N. Oliner, *Computer networks. Principe, technologies, protocols*. St. Petersburg: Piter, 2016 (in Russian).
- [4] Q.Z. Aslonov, R.B. Zhalilov, Z.B. Mukhamadieva, A.B. Safarov and R.A. Mamedov, “Efficient and convenient application to determine the functions and analysis of the reliability of the device”, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, vol. 9, is. 2, pp. 1804–1809, Dec. 2019. DOI: 10.35940/ijitee.B7323.129219
- [5] Latipov S.T., G.N. Aslanova, Nematov L.A., Akhmedov A.A., Charieva M.R. “Calculation of reliability indicators of power supply systems of consumers”, *E3S Web of Conferences*, vol. 139. № 01037, 2019. DOI: 10.1051/e3sconf/201913901037
- [6] A.V. Karmanov and K.P. Orlova, *Principy postroeniya telekommunikacionnyh sistem i telekommunikacionnye tekhnologii [Principles of building telecommunication systems and telecommunication technologies]*. M.: Gubkin university, 2015 (in Russian).
- [7] R. Jalilov, S. Latipov, Q. Aslonov, A. Choriyev and M. Charieva, “To the question of the development of servers of real-time management systems of electrical engineering complexes on the basis of modern automation systems”, in proc. *International Scientific and Practical Conference “Information Technologies and Intelligent Decision-Making Systems” (ITIDMS 2021)*, Jan. 20, 2021, Moscow, Russia. CEUR-WS, vol. 2843, 2021.
- [8] V.F. Bekker, *Tekhnicheskie sredstva avtomatizacii. Interfejsy i mikroprocessornye sredstva [Technical means of automation. Interfaces and microprocessor tools]*. Moscow: RIOR, INFRA-M, 2015, p. 71 (in Russian).
- [9] S.D. Belushkin, O.V. Demin, V.P. Klimanov and M.V. Sutyagin, “Metody i sredstva obespecheniya vysokoskorostnogo obmena informaciy v central'nom segmente telekommunikacionnoj obrazovatel'noj seti [Methods and means of ensuring high-speed information exchange in the central segment of the telecommunications educational network]”, *Industriya obrazovaniya [Education industry]*, no 2, pp. 120-124, 2002 (in Russian).
- [10] K.Z. Aslonov, “Creating a model of a wireless control system based on the Arduino Uno board with Bluetooth 2.0 technology”, *Development of science and technology*, no. 2, pp. 125-131 (in Russian).
- [11] R.B. Jalilov, Q.Z. Aslonov, U.D. Raxmatova, F.S. Atoyev, H.O. Sayfiyev, “Programma dlya cifrovogo besprovodnogo upravleniya blokom priyoma i peredachi informacii sistem telekommunikacii [Program for digital wireless control of the block for receiving and transmitting information of telecommunication systems]”, Certificate DGU 8408, July 29, 2020 (in Russian).
- [12] R.B. Jalilov and S.T. Latipov, “Intellectualizaciya sistem energetiki s ispol'zovaniem informacionnyh i kommunikacionnyh cifrovyyh tekhnologij [Intellectualization of energy systems using information and communication digital technologies]”, in proc. *Innovacionnoe razvitie elektrosetevyyh predpriyatij v usloviyah cifrovizacii otraslej ekonomiki Uzbekistana [Innovative development of electric grid enterprises in the*

- context of digitalization of sectors of the economy of Uzbekistan], Sept. 8, 2021, Tashkent, Uzbekistan, pp. 132-138 (in Russian).
- [13] R.B. Jalilov, "Improving the reliability of power supply systems in the context of digital transformation", *Problems of energy and resource saving*, special issue, pp. 84-88, 2021 (in Russian).
- [14] M.S. Ershov, V.V. Blyuk and R.B. Zhalilov, "An express methodology for calculating the reliability of power supply systems with autonomous power sources", *Energy Systems Research*, vol. 3, no. 2, pp. 13-18, 2020. DOI: 10.38028/esr.2020.02.002
- [15] M.V. Voloshenko, *Informacionnaya bezopasnost', nezavisimost' infokommunikacionnogo prostranstva Rossii [Information security, independence of the infocommunication space of Russia]*. [Online]. Available at: www.sgkurep.ru/documents/inf_security.doc [Accessed: Apr. 25, 2020] (in Russian).
- [16] M.V. Sutyagin, "Obespechenie nadezhnosti avtomatizirovannykh informacionnykh sistem na osnove setevoy klasterizacii serverov [Ensuring the reliability of automated information systems based on network clustering of servers]", Cand. of Tech. S. thesis, MSUT "STANKIN", Moscow, Russia, 2004 (in Russian).
- [17] A.V. Titov, "Modeli i metody ocenki nadezhnosti specializirovannogo programnogo obespecheniya sistem obrabotki informacii [Models and methods for assessing the reliability of specialized software for information processing systems]", Cand. of Tech. S. thesis, SPIIRAN, St. Petersburg, Russia, 2013 (in Russian).
- [18] R.B. Jalilov R.B., S.T. Latipov, G.N. Aslanova, A.A. Akhmedov and S.P. Shayimova, "Key directions of development of measures to improve the reliability of electrical power systems", *E3S Web of Conferences*, vol. 139, № 01001. DOI: 10.1051/e3sconf/201913901001
- [19] R.B. Jalilov, "Komplektnaya avtomaticheskaya transformatornaya podstanciya [Complete automatic transformer substation]", Patent FAP 01303, Apr. 26, 2018 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Новиков Николай Леонтьевич, доктор технических наук, заместитель научного руководителя АО «НТЦ ФСК ЕЭС», г. Москва, Российская Федерация.

Nikolay L. Novikov, D. Sci. (Eng.), deputy scientific supervisor of the JSC "STC FGC UES", Moscow, Russian Federation.

Жалилов Рашид Бабакулович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Бухарского инженерно-технологического института, г. Бухара, Узбекистан.

Rashid B. Jalilov, D. Sci. (Eng.), professor, head of the department of the Bukhara Engineering Technology Institute, Bukhara, Uzbekistan.

Новиков Александр Николаевич, старший научный сотрудник ФБУ «НТЦ Энергобезопасность», г. Москва, Российская Федерация.

Aleksander N. Novikov, senior researcher of the "STC Energobezopasnost", Moscow, Russian Federation.

УДК 621.332:621.316

DOI:10.46960/2658-6754 2022_2_111

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 35 кВ

Ю.И. Жарков

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС)

Ростов-на-Дону, Россия

ORCID: 00000-0003-3939-4812 e-mail: asel@rgups.ru

Н.А. Попова

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС)

Ростов-на-Дону, Россия

ORCID: 0000-0003-2010-8310 e-mail: asel@rgups.ru

Е.П. Фигурнов

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС)

Ростов-на-Дону, Россия

e-mail: asel@rgups.ru

Проанализированы вопросы эксплуатации линий электропередачи напряжением до 35 кВ для электроснабжения железнодорожных нетяговых потребителей электроэнергии. Приведен перечень основных методов контроля выполнения мер безопасности при строительстве, обновлении или реконструкции линий электропередачи для электроснабжения нетяговых потребителей. Дано их краткое описание и ссылки на нормативные источники.

Ключевые слова: железнодорожные нетяговые потребители, контроль требований безопасности, линия электропередачи.

Для цитирования: Жарков Ю.И., Попова Н.А., Фигурнов Е. П. Методы контроля безопасности железнодорожных линий электропередачи напряжением до 35 кВ // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 2. С. 111-120.

DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_111

SAFETY CONTROL METHODS FOR RAILWAY POWER TRANSMISSION LINES WITH VOLTAGE UP TO 35 kV

Yu.I. Zharkov

Rostov State Transport University

Rostov-on-Don, Russia

ORCID: 00000-0003-3939-4812 e-mail: asel@rgups.ru

N.A. Popova

Rostov State Transport University
Rostov-on-Don, Russia

ORCID: 0000-0003-2010-8310 e-mail: asel@rgups.ru

E.P. Figurnov

Rostov State Transport University
Rostov-on-Don, Russia
e-mail: asel@rgups.ru

Abstract. The article deals with issues related to the operation of power transmission lines with a voltage of up to 35 kV for the power supply of railway non-traction consumers of electricity. The list of major methods of safety control during building, renewing or reconstruction of electrified railway lines for supplying of non-traction consumers is given. Their brief description and references to normative sources are given.

Keywords: control of safety requirements, railway non-traction consumers, power transmission line

For citation: Yu.I. Zharkov, N.A. Popova and E.P. Figurnov, "Safety control methods for railway power transmission lines with voltage up to 35 kV", *Smart Electrical Engineering*, no.2, pp. 111-120, 2022. DOI:10.46960/2658-6754_2022_2_111

I. Введение

Линии электропередачи (ЛЭП) напряжением до 35 кВ для электрообеспечения железнодорожных нетяговых потребителей электроэнергии, как часть инфраструктуры железнодорожного транспорта, должны отвечать требованиям безопасности, в состав которых входят: безопасные расстояния, допустимые значения сопротивления заземляющих устройств, допустимый уровень промышленных радиопомех, пожарная безопасность, электрическая прочность изоляции, безопасные уровни нагрева проводников и воздействия электромагнитных полей, механическая прочность элементов линии [1-3]. Требования безопасности должны быть учтены в полном объеме при разработке проектной документации, строительстве, реконструкции или обновлении ЛЭП.

Полноту и качество использования указанных требований следует осуществлять путем анализа проектной документации, контроля и измерений при приемке ЛЭП в эксплуатацию.

II. Основные методы контроля выполнения мер безопасности

При выполнении контроля и измерений необходимо руководствоваться требованиями безопасности [4], межотраслевыми правилами по

охране труда (правилами безопасности) при эксплуатации электроустановок [5] и правилами безопасности [6]. Протокол испытаний ЛЭП должен содержать сведения и соответствовать требованиям, установленным в [1].

При контроле расстояний фактические (измеренные) значения сопоставляются с нормативными. Измерения следует выполнять в светлое время суток при сухой погоде и скорости ветра не более 10 м/с. Напряжение на контролируемой линии, а также на других линиях, расположенных совместно на тех же опорах, должно быть снято. Измерения можно производить с помощью мерной линейки, складного метра, рейки, рулетки со шкалами, имеющими цену деления 1 мм, каната, лазерного или ультразвукового измерителей расстояния, угломерного прибора-теодолита. Относительная погрешность измерения расстояний не должна превышать 3%.

Фактическую стрелу провеса f_c определяют по формуле:

$$f_c = h_0 - h_c - \Delta h_3, \quad (1)$$

где h_0 – измеренное значение наименьшей высоты от поверхности земли возле опоры до точки крепления провода на этой опоре; h_c – измеренное расстояние по вертикали от низшей точки провода до поверхности земли; Δh_3 – разность уровней поверхности земли под стрелой провеса и возле опоры с низшей точкой подвеса провода.

При измерении h_0 и h_c необходимо фиксировать температуру окружающего воздуха и по монтажным кривым или таблицам привести стрелу провеса f_c к температуре, при которой эта стрела получается наибольшей f_{\max} . Наименьшее расстояние от низшей точки провода до поверхности земли h_{\min} вычисляют по формуле

$$h_{\min} = h_0 - f_{\max} - \Delta h_3. \quad (2)$$

Контролируемые расстояния следует признать безопасными, если они не превышают нормативных значений и отличаются от проектных не более чем на минус 10 %.

При контроле сопротивления заземлителей – это сопротивление следует измерять с помощью специального измерительного прибора и сравнить измеренное значение с нормой. Контроль следует производить при отсоединенном от заземляющих спусков заземлителя. Отсоединение необходимо выполнить с соблюдением требований безопасности [4-6]. Для измерений надо забивать в грунт два вспомогательных электрода (токовый и потенциальный), причем токовый электрод должен находиться на расстоянии от края заземлителя $L_{эм}$, равном не менее, чем трехкратному размеру этого заземлителя, а потенциальный электрод для трех циклов измерений следует

разместить при каждом из циклов на расстоянии соответственно $L_{3п} = 0,4 L_{3т}$; $L_{3п} = 0,5 L_{3т}$; $L_{3п} = 0,6 L_{3т}$.

Измерительный прибор соединяют с электродами гибкими проводами и выполняют три цикла по три измерения в каждом, после чего находят среднее значение сопротивления в каждом цикле. Если измеренные сопротивления в первом и в третьем циклах отличаются не более чем на 10 %, то в качестве контрольного принимают среднее значение сопротивления, измеренное во втором цикле. Это сопротивление, умноженное на коэффициент, учитывающий степень влажности грунта, признается соответствующим норме, если указанное произведение не превышает нормативного значения.

В качестве измерительного прибора следует использовать измеритель сопротивления заземлений с диапазоном измерения от 0 до 15 кОм, классом точности не хуже 4,0. Погрешность измерений не должна превышать 30 %.

Метод контроля промышленных радиопомех следует использовать по [7, 8]. При контроле выполнения требований пожарной безопасности при государственной экспертизе и приемке, следует проанализировать проектную документацию и определить соответствие с устройствами ЛЭП после завершения строительства, реконструкции, или обновления. Соответствие мер пожарной безопасности требованиям [9], других нормативных документов требуется отразить в протоколе и в заключении о готовности к приемке, составляемым рабочей комиссией по утвержденной форме в соответствии с порядком приемки и ввода в эксплуатацию, установленных [1].

При контроле электрической прочности изоляторов надо осуществлять их испытания повышенным напряжением (до монтажа ЛЭП), измерение сопротивления изоляции перед их установкой на ЛЭП (только для линейных подвесных, тарельчатых фарфоровых изоляторов) и испытание всех изоляторов после монтажа на включенной под напряжение ЛЭП на предмет выявления световых или ультразвуковых признаков нарушения изоляции. Испытания повышенным напряжением (до 50 кВ) выполняются на специальной высоковольтной установке для испытания диэлектриков. Успешно прошедшими это испытание признаются изоляторы, у которых во время контроля не произошло внешних повреждений и перекрытия по поверхности.

Измерение сопротивления изоляторов выполняют мегомметром на напряжение 2500 В. Допускаются к установке изоляторы с сопротивлением не менее 300 МОм. Контроль световых и ультразвуковых признаков частичных разрядов по поверхности изоляторов следует выполнять с помощью специальных электронно-оптических и ультразвуковых дефектоскопов. Находящийся на опоре под напряжением изолятор признается дефектным,

если при испытании на его поверхности зафиксированы видимые частичные разряды или фиксируется звуковой сигнал ультразвукового дефектоскопа, усиливающийся при приближении к опоре.

При контроле электрической прочности изоляции кабельных линий следует измерить сопротивление изоляции кабелей и выполнить их испытание повышенным напряжением после завершения строительства. Измерение сопротивления необходимо осуществлять дважды: до и после испытания повышенным напряжением. Контроль следует осуществлять в сухую погоду в светлое время суток, причем, перед измерением сопротивления (после испытания повышенным напряжением) кабельная линия должна быть разряжена путем соединения всех жил и металлических элементов между собой и заземлителем в течение двух минут. Для измерения сопротивления изоляции следует использовать мегаомметр на напряжение 2500 В с допустимой основной погрешностью не более 5 % в интервале от 100 МОм до 100 ГОм. Испытание повышенным напряжением необходимо выполнять с помощью специальной мобильной установки, оборудованной высоковольтной аппаратурой для испытания диэлектриков, соответствующей [10].

Контроль следует осуществлять на линии, отключенный от источников питания и присоединенных к ней потребителей. Вместе с кабелем испытываются концевые муфты и опорные изоляторы. Кабельные выводы и вставки на воздушной линии испытываются без отсоединения от этой линии, но при отсоединенных вентильных разрядниках.

Измерение сопротивления кабельной линии мегаомметром осуществляют между каждым двумя жилами и металлической оболочкой («землей») в течение одной минуты. Повышенное напряжение испытательной установки прикладывается поочередно между каждой жилой кабеля и заземлителем, при этом другие (неиспытываемые) жилы вместе с оболочкой должны быть присоединены к заземляющему устройству. Испытательное напряжение следует поднимать до испытательного значения плавно и поддерживать испытательное напряжение неизменным в течение заданного времени. Значение испытательного напряжения и длительность времени его приложения определяются техническими условиями и нормативно-технической документацией завода-изготовителя кабельной продукции. В процессе испытаний необходимо фиксировать значение тока утечки и исправность изоляции. Если в процессе испытания не происходит уменьшения тока утечки, этот ток возрастает или является нестабильным, то испытание следует проводить до выявления дефекта (пробоя изоляции), но не более чем 15 мин.

Кабельная линия признается отвечающей требованиям по сопротивлению, если измеренное значение этого сопротивления для кабелей напряжением до 1 кВ не менее 0,5 МОм, а для кабелей напряжением свыше 1 кВ – не снижается после испытания повышенным напряжением по равнению со значением, измеренным до указанного испытания. Кабельная линия признается выдержавшей испытания повышенным напряжением, если во время испытаний не произошло пробоя изоляции или перекрытия по поверхности концевых муфт, не наблюдается резких толчков тока утечки и не происходит его перекрытия, ток утечки и коэффициент его асимметрии не превышают допустимых значений.

При контроле термической безопасности надо осуществить анализ проектной документации на предмет учета требований термической устойчивости для проводов и кабелей при расчетном токе нагрузки и в режиме короткого замыкания. Кроме того, следует осуществлять выборочную проверку контактных соединений и зажимов проводов, концевых муфт кабельных линий на ЛЭП после завершения ее сооружения, обновления или реконструкции. Такие проверки должны выполняться на включенной под рабочее напряжение ЛЭП при ее нагрузке не менее 60% от расчетной в облачную погоду или темное время суток при скорости ветра не более 5 м/с.

При контроле контактных соединений и зажимов проводов воздушных линий, а также концевых муфт кабельных линий, следует измерять превышение температуры (перегрев) над температурой окружающей среды контролируемого узла данной фазы и превышение температуры другой фазы (или целого участка провода той же фазы, отстоящего от контролируемого узла на расстояние не менее 1 м). В качестве измерительных средств необходимо использовать инфракрасные пирометры или многофункциональные тепловизоры с температурной чувствительностью не менее 0,5 °С, с помощью которых измерения осуществляют дистанционно на безопасном расстоянии без прикосновения к частям ЛЭП, находящимся под напряжением. Контролируемый узел признается термически безопасным, если превышение его температуры не превосходит превышение температуры указанного выше участка провода или заведомо исправного аналогичного узла другой фазы.

При контроле уровня магнитного поля промышленной частоты 50 Гц на селитебных территориях используются методы, установленные Роспотребнадзором [11]. При контроле уровня высокочастотного электромагнитного поля ЛЭП, (если ее провода используются как каналы высокочастотной связи), применяются методы, установленные санитарно-эпидемиологическими правилами и нормативами [12, 13].

При контроле механической прочности элементов ЛЭП осуществляется анализ проектной документации на предмет обоснования механической прочности принятых для монтажа элементов и их соответствия нормативным требованиям. Контроль выполняется при государственной экспертизе сравнением типоразмеров смонтированных элементов с принятыми в проекте по результатам обследования ЛЭП после завершения ее строительства, реконструкции или обновлении, при строительном контроле и приемке в соответствии с [1]. При сопоставлении размеров смонтированных элементов с размерами по стандарту, техническим условиям или паспортным значениям измеряют диаметр проводов с погрешностью не более 0,1 мм, размеры изоляторов и арматуры, а также размеры стоек с относительной погрешностью не более 3 %.

При контроле механической защиты кабелей осуществляют проверку принятых в проектной документации мер и их соответствие выполненным при строительстве, реконструкции или обновлении. Контроль соответствия осуществляют путем анализа проектной документации при государственной экспертизе и приемке, наблюдении за монтажом при строительном контроле, выборочной частичной откопке траншей в соответствии с требованиями [1]. При контроле измеряют ширину и глубину траншеи, толщину подсыпки и засыпки, фиксируют число кабелей в траншее, вид и марку механической защиты. Для измерений допускается использование мерной линейки, рулетки, других измерительных средств с ценой деления 1 мм с погрешностью не более 5 мм. Механическая защита признается отвечающей требованиям безопасности, если ее выполнение и место установки соответствуют установленным нормам.

III. Заключение

Для обеспечения безопасности при эксплуатации линий электропередачи напряжением до 35 кВ необходимо соблюдать ряд требований, исключающих возможность вредного и опасного влияния на объекты инфраструктуры, оперативный персонал, окружающую среду. В материалах публикации приведен перечень и даны рекомендации по применению основных методов контроля выполнения мер безопасности при строительстве, обновлении или реконструкции линий электропередачи напряжением до 35 кВ.

© Жарков Ю.И., 2022

© Попова Н.А., 2022

© Фигурнов Е.П., 2022

Поступила в редакцию 13.04.2022

Received 13.04.2022

Библиографический список

- [1] ТР ТС 003/2011. О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта. Принят 2011-07-15.
- [2] ТР ТС 002/2011. О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта. 2011-07-15.
- [3] Жарков Ю.И., Попова Н.А., Фигурнов Е.П. Требование безопасности для железнодорожных линий электропередачи напряжением до 35 кВ // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 1. С.74-82. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_74
- [4] ГОСТ 12.3.019-80. Система стандартов безопасности труда. Испытания и измерения электрические. Общие требования безопасности. Введ. 1981-07-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 8 с.
- [5] ПОТ Р М-016-2001, РД 153-34.0-03.150-00. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. Введ. 2001-07-01. М.: Издательство «НЦ ЭНАС», 2001. – 216 с.
- [6] ЦЭ-750. Правила безопасности при эксплуатации контактной сети и устройств электроснабжения автоблокировки железных дорог. М.: ТРАНСИЗДАТ, 2000. – 80 с.
- [7] ГОСТ 22012-82. Радиопомехи промышленные от линий электропередачи и электрических подстанций. Нормы и методы измерения. Введ. 1983-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1995. – 7 с.
- [8] ГОСТ 29205-91. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от электротранспорта. Нормы и методы испытаний. Введ. 1993-01-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 5 с.
- [9] ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. Введ. 1992-07-01. М.: Стандартиформ, 2006. – 64 с.
- [10] ГОСТ 2990-78. Кабели, провода, шнуры. Методы испытания напряжением. Введ. 1980-01-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 16 с.
- [11] ГН 2.1.8/2.2.4.2262-07. Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц в помещениях жилых, общественных зданий и на селитебных территориях. Утв. 2007-08-21. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. – 8 с.
- [12] СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов (в редакции Изм. №1, Утв. 2007-12-19).
- [13] СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях. Утв. 2003-02-19, с Изм. №1 СанПиН 2.1.8/2.2.4.2490-09, Утв. 2009-03-02.

References

- [1] O bezopasnosti infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta [On the safety of the railway transport infrastructure], TR CU 003/2011, July 15, 2011 (in Russian).
- [2] O bezopasnosti vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta [On the safety of high-speed rail transport], TR CU 002/2011, July 15, 2011 (in Russian).

- [3] Yu.I. Zharkov, N.A. Popova N.A. and E.P. Figurnov, "Safety requirement for railway power transmission lines with voltage up to 35 kV", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 74-82, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_74 (in Russian).
- [4] Occupational safety standards system. Electrical tests and measurements. General safety requirements, GOST 12.3.019-80, July 1, 1981 (in Russian).
- [5] *Mezhotraslevnye pravila po ohrane truda (pravila bezopasnosti) pri ekspluatatsii elektroustanovok* [Intersectoral rules on labor protection (safety rules) during the operation of electrical installations], POT R M-016-2001, RD 153-34.0-03.150-00, July 1, 2001 (in Russian).
- [6] *CE-750. Pravila bezopasnosti pri ekspluatatsii kontaktnoj seti i ustrojstv elektrosnabzheniya avtoblokirovki zheleznih dorog* [Safety rules for the operation of the contact network and power supply devices for automatic blocking of railways]. Moscow: TRANSIZDAT, 2000 (in Russian).
- [7] Man-made noise from overhead power lines and electric substations. Limits and measuring methods, GOST 22012-82, July 1, 1983 (in Russian).
- [8] Electromagnetic compatibility of technical means. Man-made noise from electrical transport. Limits and test methods, GOST 29205-91, Jan. 1, 1993 (in Russian).
- [9] Occupational safety standards system. Fire safety. General requirements, GOST 12.1.004-91, July 1, 1992 (in Russian).
- [10] Cables, wires and cords. Methods of voltage test, GOST 2990-78, Jan. 1, 1980 (in Russian).
- [11] *Predel'no dopustimye urovni magnitnyh polej chastotoj 50 Gc v pomeshcheniyah zhi-lyh, obshchestvennyh zdaniy i na selitebnyh territoriyah* [Maximum permissible levels of magnetic fields with a frequency of 50 Hz in residential, public buildings and residential areas], GN 2.1.8/2.2.4.2262-07, Aug. 21, 2007 (in Russian).
- [12] *Gigienicheskie trebovaniya k razmeshcheniyu i ekspluatatsii peredayushchih radio-tekhnicheskikh ob"ektov* [Hygienic requirements for the placement and operation of transmitting radio engineering facilities], SanPiN 2.1.8/2.2.4.1383-03 (in ed. no. 1 on Dec. 19, 2007) (in Russian).
- [13] *Elektromagnitnye polya v proizvodstvennyh usloviyah* [Hygienic requirements for the placement and operation of transmitting radio facilities], SanPiN 2.2.4.1191-03, Feb. 19, 2003, in ed. no. 1 by SanPiN 2.1.8/2.2.4.2490-09 on March 2, 2009 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Жарков Юрий Иванович, доктор технических наук, профессор Ростовского государственного университета путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Yury I. Zharkov, D. Sci. (Eng.), professor of the Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

Попова Наталия Андреевна, кандидат технических наук, заведующая кафедрой Ростовского государственного университета путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Natalia A. Popova, Cand. Sci. (Eng.), head of the chair of the Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Фигурнов Евгений Петрович, доктор технических наук, профессор Ростовского государственного университета путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Evgeny P. Figurnov, D. Sci. (Eng.), professor of the Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

УДК 621.313.3

DOI 10.46960/2658-6754_2022_2_121

К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ СИНХРОННЫХ И АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ РАСЧЕТАХ УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Е.К. Лоханин

ООО «Институт «Энергосетьпроект»
Москва, Россия

Исследуются методы математического моделирования синхронных и асинхронизированных электрических машин (АСМ) при расчетах установившихся и переходных режимов. Обозначены главные отличия синхронных машин продольно-поперечного возбуждения (СМ ППВ) от АСМ, а также основные понятия определений СМ ППВ и АСМ. Синхронные машины продольного и продольно-поперечного возбуждения (СМ ПВ и СМ ППВ) не всегда позволяют в полной мере решать возникающие проблемы обеспечения устойчивости и надежности в установившихся и переходных режимах энергосистем. Они способны работать лишь в ограниченной области потребления реактивной мощности, что связано с нарушением их устойчивой работы. Значительно лучшими техническими характеристиками наделены АСМ, особенно в режимах потребления реактивной мощности. Динамическая устойчивость АСМ мало зависит от их режима работы и существенно выше, чем у СМ ППВ и СМ ПВ. Система возбуждения АСМ позволяет обеспечить независимое регулирование электромагнитного момента и напряжение статора.

Ключевые слова: АРВ, асинхронизированные машины, продольно-поперечное возбуждение, синхронные машины, управляющая поперечная обмотка.

Для цитирования: Лоханин, Е.К. К вопросу о моделировании синхронных и асинхронизированных электрических машин при расчетах установившихся и переходных режимов энергосистем // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 2. С. 121-131. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_121

TO THE QUESTION OF SIMULATION OF SYNCHRONOUS AND ASYNCHRONIZED SYNCHRONOUS MACHINES IN CALCULATIONS OF STEADY AND TRANSIENT MODES OF ENERGY SYSTEMS

E.K. Lochanin

LLC "Institute "Energosetproekt"
Moscow, Russia

Abstract. The article develops methods of mathematical modeling of synchronous and asynchronous synchronous machines (ASM) in the calculations of steady and transient modes. The work is devoted to the main differences between synchronous direct and quadrature axis machines (SM DQE) from ASM, as well as the concepts in the definition of SM DQE and ASM. Synchronous direct axis excitation machines (SM DE) and SM DQE don't always allow to fully solve the problems of stability and reliability in steady and transient modes of power systems. These machines are capable of operating only in a limited area of reactive power consumption, which is associated with a violation of their stability. ASM has significantly better technical characteristics, especially in reactive power consumption modes. ASM dynamic stability slightly depends on their mode of operation and is significantly higher than that of SM DQE and, moreover, SM DE. The ASM excitation system provides independent control of the electromagnetic torque and stator voltage.

Key words: AVR, asynchronous synchronous machines, longitudinal-transverse excitation, synchronous machines, control transverse winding.

For citation: E.K. Lokhanin, "To the question of simulation of synchronous and asynchronous synchronous machines in calculations of steady and transient modes of energy systems", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 121-131, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_121

I. Введение

Систематические работы в области теории, практики, терминологии и внедрения синхронных машин продольно-поперечного возбуждения (СМ ППВ) [1-3] и асинхронизированных электрических машин (АСМ) [4] впервые были начаты в ВНИИЭ под руководством М.М. Ботвинника [5-8] в сотрудничестве с организациями ВНИИЭМ, ВЭИ и заводом изготовителем «Электросила». Для этой цели в ВНИИЭ была организована лаборатория асинхронизированных машин, ставшая научным центром применения этих машин в энергетике.

После успешной работы по созданию асинхронизированных генераторов 50 МВА для Иовской ГЭС в 1950-1960 гг. наступил перерыв до конца 1970-х гг., когда японские, затем немецкие и французские фирмы начали массовое производство и внедрение асинхронизированных генераторов мощностью от 80 до 1000 МВт. За разработку АСМ и сильного регулирования возбуждения М.М. Ботвинником совместно с группой сотрудников ВНИИЭ были получены патенты в США, Англии, Франции, Японии и авторское свидетельство в СССР. Однако в России возобновления производства АСМ так и не последовало, несмотря на выявленные в процессе эксплуатации у нас и за рубежом значительные преимущества этих машин (особенно гидрогенераторов перед СМ ППВ).

Настоящая статья является продолжением исследований [4]. Основное содержание работы связано с моделированием и программной реализацией системы регулирования АСМ, представленной в [5, 6], где используется понятие АСМ, введенное М.М. Ботвинником. Также показано противоречие трактовки асинхронизированных машин в [9, 10] фундаментальным исследованиям [5-8].

II. Основные особенности систем возбуждения СМ ППВ и АСМ

Основные характеристики системы возбуждения АСМ приведены в [5, 6]. Следует отметить, что одно из главных различий между АСМ и СМ ППВ заключается в питании обмоток возбуждения АСМ не постоянным, как в СМ ППВ, а переменным током, амплитуда и частота которых изменяются в соответствии с заданным законом управления.

Существуют две группы модификаций СМ ППВ: с симметричными (одинаковыми) обмотками возбуждения (СОВ) и с несимметричной системой обмоток возбуждения, получивших название управляющих поперечных обмоток (УПО). Наиболее простая модификация электромагнитного момента для СМ ППВ с СОВ на роторе представляется как:

$$M_s = \frac{E_q U}{x} \sin \delta + \frac{E_d U}{x} \cos \delta = \frac{E_\Sigma U}{x} \sin(\delta + \alpha), \quad (1)$$

где $E_\Sigma = \sqrt{E_q^2 + E_d^2}$ – модуль суммарной ЭДС; $\alpha = \arctg \frac{E_d}{E_q}$ – угол, определяющий соотношение ЭДС в обмотках ротора.

Аналогично для УПО на роторе [11] при не учете активного сопротивления статора имеем:

$$M_s = \frac{E_q U}{x_d} \sin \delta + \frac{E_d U}{x_q} \cos \delta + \frac{U^2 (x_d - x_q)}{2x_d x_q} \sin 2\delta. \quad (2)$$

Отметим, что все СМ ППВ, рассматриваемые в [9, 10, 12], ошибочно представляются асинхронизированными с термином АСТГ. В [5, 6] для определения понятия «асинхронизированная синхронная машина» используется термин АСМ.

Рассмотрим характерные особенности систем возбуждения АСМ и АСТГ (СМ ППВ), которые состоят в следующем. Конструктивно ротор АСМ, в отличие от СМ ППВ, является многофазным. Для исследования такой многофазной системы возбуждения последняя может быть приведена к двухфазной с двумя взаимно перпендикулярными одинаковыми обмотками.

Для АСМ, характеризующейся одинаковыми симметричными обмотками возбуждения, было получено в [6], в отличие от СМ ППВ и АСТГ, выражение электромагнитного момента M_s , зависящее от скольжения ротора s , а не от угла δ , как в СМ ППВ и АСТГ:

$$M_s = \frac{U^2 s \omega_s \mu T}{x(1 + s^2 \omega_s^2 \sigma^2 T^2)} + \frac{U}{x} A_d, \quad (3)$$

где U – напряжение системы; $\mu = 1 - \sigma$ – коэффициент магнитной связи; $x = x_d = x_q$ – синхронное реактивное сопротивление системы; $T = T_d = T_q$ – постоянная времени обмоток возбуждения; ω_s – синхронная угловая скорость; $\sigma = \frac{x'}{x}$ – коэффициент магнитного рассеяния; $x' = x'_d = x'_q$ – переходное реактивное сопротивление системы.

Отметим, что первая составляющая в (3) определяет асинхронный момент $M_{ав}$, который обеспечивается заданным скольжением $s = s_0$. Более того M_a в системе возбуждения фиксирует дополнительную отрицательную обратную связь по скольжению, определяя АСМ более устойчивой, чем СМ ППВ и АСТГ при нарушениях режима работа в электрической системе. Значение M_a достигает своего максимального значения при критическом скольжении $s_{кр} = \pm 1/\omega_s \sigma T$. При скольжении большем критического АСМ становится неустойчивой по скорости.

Вторая составляющая в (3) определяет синхронный момент M_c , который для повышения устойчивости следует сделать зависимым от скольжения путем выбора $A_d = a_0 + a_1 s$. Коэффициенты a_0 и a_1 определяются из условия отсутствия самораскачивания.

Регулирование возбуждения в АСМ осуществляется в двух взаимно перпендикулярных осях d и q , которое оказалось возможным только с введением сильного регулирования в АРВ. Полное описание системы возбуждения и блок-схемы регуляторов АРВ асинхронизированных генераторов приведены в [5, 6].

В АСМ, в отличие от АСТГ и СМ ППВ, создается круговое вращающееся поле возбуждения, при котором магнитный поток остается неизменным и имеет одинаковое магнитное сопротивление во всех направлениях. При этом ротор АСМ должен быть неявнополюсным.

У АСТГ и СМ ППВ из-за электрической несимметрии у неявнополюсных, а у явнополюсных машин дополнительно из-за магнитной асимметрии ротора, речи о создании кругового вращающегося поля возбуждения, которое требуется для АСМ, идти не может. Ротор АСМ может перемещаться со скольжением относительно синхронной скорости вращения, не переходя при этом в асинхронный режим с потерей мощности, что имеет

место в синхронных машинах продольного возбуждения, СМ ППВ и АСТГ. Более того, эта машина может работать как на длинную, так и короткую электропередачу [13]. Эта машина, названная М.М. Ботвинником асинхронизированной, способна быть и двигателем, и генератором при любом знаке скольжения, а также в синхронном режиме при $s = 0$.

Отметим, что зависимость M_s от скольжения не распространяется на машины с разными обмотками возбуждения, где $x_d \neq x_q$ и которые по определению в [6] не могут считаться асинхронизированными. В [10] эти машины ошибочно относятся к асинхронизированным, на том основании, что их «динамические характеристики систем возбуждения в области малых отклонений параметров режима такие же как у асинхронизированных машин с симметричными обмотками возбуждения». Однако эти характеристики несопоставимы, так как в первом случае они определяются углом δ , а во втором – скольжением s .

При эксплуатации систем возбуждения АСМ их параметры следует выбирать так, чтобы обеспечивался требуемый диапазон рабочих скольжений. При этом асинхронный момент M_a в пределах заданного скольжения определяет саму суть системы возбуждения АСМ. При отсутствии такого момента, что характерно для СМ ППВ и АСТГ, понятие «асинхронизированная синхронная машина» теряет всякий смысл.

Отметим, что работа АСМ с отрицательным скольжением существенно увеличивает динамическую устойчивость АСМ. Длительность аварийного возмущения может быть большей, если в установившемся режиме эта машина работала с отрицательным скольжением. Основным требованием при расчете АСМ является получение минимального возможного значения постоянной времени обмоток возбуждения, поскольку чем меньше эта постоянная времени, тем меньше требуемое потолочное напряжение возбуждения необходимое при одних и тех же значениях скольжения.

Следует отметить, что независимость M_s от угла δ при движении ротора не нарушается и при скольжении $s \neq 0$. При этом ток в обмотках ротора имеет частоту скольжения. В результате в системе возбуждения АСМ создается бегущее магнитное поле, перемещающееся относительно ротора со скоростью $s\omega_s$.

Таким образом, реализацию асинхронизированной машины определяют следующие факторы: наличие одинаковых симметричных обмоток; возбуждения по d и q осям; питание обмоток возбуждения не постоянным, как в СМ ППВ, а переменным током, амплитуда и частота, которого изменяется с заданным законом управления; наличие многофазного и шихтованного ротора; зависимость электромагнитного момента от скольжения; независимость устойчивости от угла; использование структуры АРВ сильного действия. Отмеченные факторы определяют характер изменения рабочего

поля возбуждения, скольжений s и углов δ в уравнениях движения, основные свойства и конструктивное исполнение АСМ.

III. К вопросу о определении СМ ППВ и АСМ

В [9] все рассматриваемые генераторы, в том числе, генераторы Бурштынской ГРЭС АСТГ-200 и их системы возбуждения, названы асинхронизированными. Они определены как «классический пример асинхронизированных машин, обладающих всеми классическими свойствами АСТГ» и использующих для этой цели преобразователь координат. Такое представление генераторов противоречит описанию асинхронизированной машины и ее системы возбуждения в [5, 6]. Как будет показано ниже, утверждение, что преобразователь координат определяет асинхронизированные машины и связан с «устранением угловых характеристик», по нашему мнению, является несостоятельным.

Наличие преобразователя координат позволяет задавать в регуляторе продольно-поперечного возбуждения [4, рис. 3] каналы регулирования и стабилизации начальными значениями коэффициентов K_I , K_S , K_φ и K_U . При этом их изменения в переходном режиме учитываются преобразователем координат, действия которого определяются следующими угловыми характеристиками, полученными из его схемы замещения.

По продольной оси:

$$\begin{aligned} K_I(\varphi_U) &= K_{I0}\sin\varphi_U; & K_S(\varphi_U) &= K_{S0}\sin\varphi_U; \\ K_\varphi(\varphi_U) &= K_{\varphi0}\sin\varphi_U; & K_U(\varphi_U) &= K_{U0}\cos\varphi_U; \\ I_0 &= I_{q0}; & I &= I_q. \end{aligned} \quad (4)$$

На поперечной оси угловые характеристики имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} K_I(\varphi_U) &= K_{I0}\cos\varphi_U; & K_S(\varphi_U) &= K_{S0}\cos\varphi_U; \\ K_\varphi(\varphi_U) &= K_{\varphi0}\cos\varphi_U; & K_U(\varphi_U) &= -K_{U0}\sin\varphi_U; \\ I_0 &= I_{d0}; & I &= I_d. \end{aligned} \quad (5)$$

где φ_U – угол между системами координат (x, y) и (d, q) .

Таким образом, ни о каком «устранении угловых характеристик» речи быть не может.

Как показали в [1, 3] расчеты установившихся и переходных режимов, два генератора ППВ Бурштынской ГРЭС характеризуются устойчивостью по углу δ , свойственной синхронным, а не асинхронизированным машинам. Аналогичные машины представляются синхронными и за рубежом [14, 15].

В отличие от асинхронизированных машин, система АРВ АСТГ этих генераторов из-за наличия угла сдвига между продольной осью ротора и

вектором напряжения опорного узла исключает работу со скольжением в установившемся режиме. В [9, 10] определение АСМ, принятое в [5], полностью игнорируется: «машину с характеристикой синхронного момента, определяемой по скольжению, будем сокращенно называть АСМ (асинхронизированная синхронная машина), где термин АСМ указывает на возможность работы со скольжением в установившемся режиме».

В [9, 10], на наш взгляд, необоснованно и независимо от конструкции ротора, используется такое же название «асинхронизированная» с термином АСТГ применительно к электрическим машинам продольно-поперечного возбуждения, использующих в системе возбуждения преобразователь координат. Также в [9, 10] не учитывались уравнения электромагнитного момента АСМ (3). На производстве АСМ, несмотря на возрастающее их внедрение за рубежом, это сказывается крайне негативно.

Конструкция асинхронизированных машин и режим их работы имеют много общего с асинхронными машинами. В этом и состоит смысл введения названия «асинхронизированная синхронная машина» для машины АСМ, принципиально отличной от СМ ППВ и АСТГ. Отметим, что в [5] название «асинхронизированная» введено на том основании, что устойчивость такой машины определяется скольжением s аналогично асинхронной машине, а не углом δ , как в СМ ППВ и АСТГ.

Преобразователь координат был впервые применен в АРВ СМ ППВ [7, 8], не называя при этом эти машины асинхронизированными.

Таким образом, преимуществами АСМ и их систем возбуждения перед СМ ППВ и АСТГ являются:

- простота при синхронизации АСМ независимо от их мощности, так как результирующее поле возбуждения всегда синхронно с частотой сети;
- возможность АСМ оставаться в синхронизме и отдавать требуемую мощность при любом положении ротора, который может перемещаться со скольжением относительно синхронной скорости вращения;
- отсутствие дорогостоящих средств компенсации реактивных сопротивлений длинных линий электропередач при применении в качестве генераторов на этих линиях АСМ;
- способность быть и двигателем, и генератором при любом знаке скольжения s , а также в синхронном режиме при $s = 0$;
- обеспечение работы со скольжением в установившемся режиме;
- повышение пределов по статической и динамической устойчивости.

IV. Выводы

1. Применение асинхронизированных электрических машин (АСМ) расширяет возможности строительства длинных линий электропередачи пе-

ременного тока без применения дорогостоящих средств компенсации их реактивных сопротивлений. При этом эффект от использования АСМ будет тем большим, чем мощнее и протяженнее электропередача.

2. В АСМ, характеризующейся одинаковыми симметричными обмотками возбуждения, создается круговое вращающееся поле, при котором электромагнитный момент зависит не от угла δ , как в СМ ППВ и АСТГ, а от скольжения s . При этом ротор может перемещаться со скольжением относительно синхронной скорости вращения, не переходя при этом в асинхронный режим с потерей мощности, что имеет место в СМ ППВ и АСТГ.

3. Питание обмоток возбуждения в АСМ осуществляется не постоянным как в СМ ППВ и АСТГ, а переменным током, амплитуда и частота которого меняется по заданному закону управления. При эксплуатации АСМ параметры систем возбуждения следует выбирать, обеспечивая требуемый и допустимый диапазон изменений рабочего скольжения.

4. Работа АСМ с отрицательным скольжением значительно увеличивает электродинамическую устойчивость энергосистемы. Длительность допустимого аварийного возмущения может быть существенно большей, если машина до аварии работала с отрицательным скольжением.

5. Искаженные отождествления асинхронизированных машин с термином АСТГ определяют не АСМ, а СМ ППВ. Это не может способствовать промышленному производству действительных АСМ, которые, как показали наши исследования, обладают значительно большей устойчивостью при нарушениях режимов энергосистемы, чем СМ ППВ и АСТГ.

V. Заключение

Рассмотренные модели электрических машин с продольно-поперечным регулированием возбуждения реализованы в программных режимных комплексах ДИС КУ и ДАКАР. Они широко внедрялись и внедряются в энергосистемах России и ближнем зарубежье, и в дальнейшем будут способствовать внедрению асинхронизированных машин, где их динамическая устойчивость мало зависит от их режима работы и существенно выше, чем у СМ ППВ и АСТГ.

© Лоханин Е.К., 2022

*Поступила в редакцию 06.05.2022
Received 06.05.2022*

Библиографический список

- [1] Гараев Ю.Н., Лоханин Е.К., Россковский Е.Л. Особенности моделирования синхронных машин продольно-поперечного возбуждения // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2015. № 1 (72). С. 44-64.

- [2] Лоханин Е.К. Методы моделирования, расчета и анализа стационарных и переходных режимов в энергосистемах. М.: Знак, 2014. – 456 с.
- [3] Лоханин Е.К., Гараев Ю.Н., Россовский Е.Л. Моделирование синхронных машин продольно-поперечного возбуждения без учета их системы регулирования // Энергетик. 2015. № 7. С. 21-25.
- [4] Лоханин Е.К., Гараев Ю.Н., Россовский Е.Л., Глаголев В.А. Представление систем управления возбуждением асинхронизированных машин для расчета режимов работы энергосистем // Электротехника. 2019. № 1. С. 59-69.
- [5] Блоцкий Н.Н., Ботвинник М.М. Асинхронизированные синхронные машины // Труды ВНИИЭ. 1959. № 9.
- [6] Ботвинник М.М. Асинхронизированная синхронная машина. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 70 с.
- [7] Ботвинник М.М., Феци-Жилинская М.С. Регулирование возбуждения синхронных машин в продольной и поперечной осях ротора // Труды ЦНИЭЛ. 1957. Вып. 6.
- [8] Ботвинник М.М., Городский Д.А., Карполь Э.М., Сазонова Э.К. Экспериментальное исследование работы синхронной машины с продольно-поперечным возбуждением // Вестник электропромышленности. 1957, № 2.
- [9] Шакарян Ю.Г. [и др.]. Разработка и перспективы применения новых типов турбогенераторов с векторной системой управления возбуждением // Электротехника. 2010. № 2. С. 4а-9.
- [10] Довганюк И.Я., Лабунец И.А., Плотникова Т.В., Сокур П.В., Шакарян Ю.Г. Концепция построения системы управления возбуждением асинхронизированных турбогенераторов // Электротехника. 2010. № 2. С. 30-35.
- [11] Каспаров Э.А. Новые режимные возможности синхронных машин в энергосистемах. М.: Спутник+, 2011. – 339 с.
- [12] Лабунец И.А. [и др.] Методические указания по применению асинхронизированных турбогенераторов на реконструируемых, расширяемых и вновь строящихся тепловых электростанциях различных типов. М.: ВНИИЭ РАО «ЕЭС России», 1996.
- [13] Кошечев Л.А. Об использовании асинхронизированных синхронных генераторов на мощных электростанциях, удаленных от центра потребления // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2016. № 2 (75). С. 91-101.
- [14] Malik O.P. et al. Dual-exitiated synchronous machines – characteristics and application in the large power system // J. Inst. Eng. (India) Elec. Eng. Div. 1975. № 1.
- [15] Andrew Y., Vitaly Y. Pulse controlled thyristor excitation regulator for a two – axis synchronous machine // IEEE Con/Rec. 9th Annual IEEE Ind APPL. Soc. 1974. Part 1.

References

- [1] U.N. Garaev, E.K. Lochanin and E.L. Rossovsky, "Features of modeling of synchronous direct and quadrature axis machines", *Izvestiya NTC Edinoj Energeticheskoy Sistemy [STC of Unified Power System Proceedings]*, no. 1 (72), pp. 44-64, 2015 (in Russian).
- [2] E.K. Lochanin, *Metody modelirovaniya, rascheta i analiza stacionarnykh i perekhodnykh rezhimov v energosistemakh [Methods of modeling, calculation and analysis of stationary and transient modes in power systems]*. Moscow: Znack, 2014 (in Russian).
- [3] E.K. Lochanin, U.N. Garaev, and E.L. Rossovsky, "Modelirovanie sinhronnykh mashin prodol'no-poperechnogo vzbuzhdeniya bez ucheta ih sistemy regulirovaniya [Modeling of synchronous direct and quadrature axis machines without taking into account their control system]", *Energetik*, no. 7, pp. 21-25, 2015 (in Russian).
- [4] E.K. Lokhanin, Yu.N. Garaev, E.L. Rossovsky and V.A. Glagolev, "About simulation of synchronous and asynchronous synchronous machines for calculations of operating modes of power systems", *Elektrotehnika*, no. 1, pp. 59-69, 2019.
- [5] N.N. Blotsky and M.M. Botvinnik, "Asinhronizirovannyye sinhronnyye mashiny [Asynchronized synchronous machines]", *Trudy VNIIE [Proceedings of VNIIEF]*, no. 9, 1959 (in Russian).
- [6] M.M. Botvinnik, *Asinhronizirovannaya sinhronnaya mashina [Asynchronized synchronous machine]*. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1960 (in Russian).
- [7] M.M. Botvinnik M.M. and N.S. Fezi-Zhilinskaya, "Regulirovanie vzbuzhdeniya sinhronnykh mashin v prodol'noy i poperechnoy osyakh rotora [Regulation of excitation of synchronous machines in the longitudinal and transverse axes of the rotor]", *Trudy CNIEL [Proceedings of CSREL]*, no. 6, 1957 (in Russian).
- [8] M.M. Botvinnik, D.A. Gorodsky, E.M. Karpol' and E.K. Sazonova, "Eksperimental'noe issledovanie raboty sinhronnoy mashiny s prodol'no-poperechnym vzbuzhdeniem [Experimental study of the operation of a synchronous machine with longitudinal-transverse excitation]", *Vestnik elektropromyshlennosti [Bulletin of the electrical industry]*, no. 2, 1957 (in Russian).
- [9] Yu.G. Shakaryan et al., "Razrabotka i perspektivy primeneniya novykh tipov turbogeneratorov s vektornoj sistemoy upravleniya vzbuzhdeniem [Development and prospects for the use of new types of turbogenerators with a vector excitation control system]", *Elektrotehnika*, no. 2, pp. 4a-9, 2010 (in Russian).
- [10] I.Ya. Dovganyuk, L.A. Labunec, T.V. Plotnikova, P.V. Sokur and Yu.G. Shakaryan, "Konceptiya postroeniya sistemy upravleniya vzbuzhdeniem asinhronizirovannykh turbogeneratorov [The concept of building a control system for the excitation of asynchronized turbogenerators]", *Elektrotehnika*, no. 2, pp. 30-35, 2010 (in Russian).
- [11] E.A. Kasparov, *Novyye rezhimyye vozmozhnosti sinhronnykh mashin v energosistemakh [New operating possibilities of synchronous machines in power systems]*. Moscow: Sputnik +, 2011 (in Russian).
- [12] I.A. Labunets et al., *Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu asinhronizirovannykh turbogeneratorov na rekonstruirovannykh, rasshiraemykh i vnov' stroyashchih teplykh elektrostanciyah razlichnykh tipov [Guidelines for the use of asynchronized turbogenerators at reconstructed, expanded and newly built thermal power plants of various types]*. Moscow: VNIIE RAO "UES of Russia", 1996 (in Russian).

- [13] L.A. Koshcheev, "Utilization of asynchronized synchronous generators for electrical energy transmission from a distantpower plant", *Izvestiya STC of the Unified Energy System*, no. 2 (75), pp. 91-101, 2016 (in Russian).
- [14] O.P. Malik et al. "Dual-exitated synchronous machines – characteristics and application in the large power system", *J. Inst. Eng. (India) Elec. Eng. Div.*, no. 1, 1975.
- [15] Y. Andrew and Y. Vitaly, "Pulse controlled thyristor excitation regulator for a two – axis synchronous machine", *IEEE Con/Rec. 9th Annual IEEE Ind APPL. Soc.*, part 1, 1974.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ
INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Лоханин Евгений Константинович, доктор технических наук, начальник лаборатории ООО «Институт «Энергосетьпроект», г. Москва, Российская Федерация.

Evgeniy K. Lochanin, D. Sci. (Eng.), head of the laboratory of the LLC "Institute "Energosetproekt", Moscow, Russian Federation.

ХРОНИКА

ХII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ»

В НГТУ им. Р.Е. Алексеева с 16 по 20 мая 2022 г. прошла ХII Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи». В конференции приняли участие более 170 студентов, молодых ученых и специалистов из 12 энергокомпаний и 26 российских и зарубежных вузов более чем из 30 городов РФ: Архангельска, Барнаула, Владимира, Воронежа, Екатеринбурга, Иваново, Иркутска, Казани, Калининград, Кемерово, Краснодар, Красноярск, Минск, Москва, Нижний Новгород, Новосибирска, Новочеркасска, Пензы, Петрозаводска, Пятигорска, Самары, Санкт-Петербурга, Саранска, Смоленска, Ставрополя, Томска, Тюмени, Уфы, Хабаровскы, Чебоксар, Челябинска, Читы, Якутскы и др. Экспертами конференции были 70 ведущих профессионалов отрасли и известных ученых.

Организаторами конференции выступили Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, АО «Системный оператор Единой энергетической системы», Российский национальный комитет международного совета по большим электрическим системам высокого напряжения (РНК СИГРЭ) и Благотворительный фонд «Надежная смена». Конференцию ежегодно поддерживают Министерство энергетики Российской Федерации и Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

В приветственном слове участникам конференции министр энергетики Российской Федерации **Николай Шульгин** отметил: *«Именно от сегодняшних студентов и молодых специалистов, их активного включения в решение ключевых задач электроэнергетики зависит эффективность применения в отрасли передовых технологий, внедрения научно-технических разработок, а также цифровой трансформации электроэнергетики».*

Министр науки и высшего образования Российской Федерации **Валерий Фальков** в приветствии участникам подчеркнул: *«Перед энергетиками стоят масштабные задачи по модернизации мощностей, увеличению экономической эффективности, повышению надежности. Практические знания и профессиональные компетенции, которые получают участники, взаимодействуя с коллегами и ведущими экспертами, помогут им не только реализовать себя, но и вывести электроэнергетическую отрасль на качественно новый уровень».*

Участников конференции поздравил председатель правления АО «СО ЕЭС» **Федор Опачный**: *«Конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» формирует новое пространство для нетворкинга, стимулирует обмен знаниями, мнениями и опытом, поиск новых идей и решений. Это уникальная возможность построить открытый, доверительный диалог между молодыми специалистами, уже работающими в отрасли, и студентами лучших учебных заведений России, получить обратную связь и выдвинуть собственные идеи и концепции развития отрасли».*

На открытии конференции выступил ректор НГТУ им. Р.Е. Алексева **Сергей Дмитриев**: *«Наш вуз входит в программу стратегического академического лидерства «Приоритет 2030», которая нацелена на обеспечение прорывного развития и конкурентоспособности страны путем формирования нового технологического уклада и индустрии 5.0, подготовки инженерной элиты XXI века, воспитания молодого поколения патриотов России. Отмечу, что на протяжении многих лет НГТУ имени Ростислава Евгеньевича Алексева является ведущим техническим вузом, осуществляющим подготовку инженерных и научных кадров для промышленности. Вот уже более века мы успешно готовим для России высококвалифицированных специалистов. Именно наши выпускники пополняют отечественную экономику надежными кадрами, трудящимися на благо процветания родной страны. Одним из важнейших образовательных и научных направлений университета является электроэнергетика. Нами подготовлено более 15000 инженеров-энергетиков, успешно работающих на предприятиях отрасли».*

Участникам пожелала успеха министр образования, науки и молодежной политики Нижегородской области **Ольга Петрова**: *«Нижегородский политех по праву является одним из лучших опорных университетов страны и занимает важное место на отечественной платформе высшего образования. НГТУ развивает важное направление – электроэнергетику, сотрудничая с мощными промышленными партнерами. Участники конференции сегодня погружены в решение стратегических задач, а после окончания университета будут иметь важные для старта карьеры компетенции. Уверена, что в рамках мероприятия мы услышим множество инновационных идей, которые найдут свое продолжение в грантах и проектах, а также дадут толчок к развитию различных направлений науки».*

Директор по персоналу АО «СО ЕЭС» **Байрта Первеева** выразила благодарность организаторам и партнерам конференции и отметила роль конференции в развитии отрасли: *«Конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» помогает участникам – студентам, аспирантам, молодым специалистам и ученым – выработать свой взгляд на актуальные про-*

блемы отрасли, предложить пути их решения, стимулирует интерес к исследовательской работе, расширяет профессиональный кругозор. Именно от них зависит, какой будет российская энергетика завтрашнего дня. Чем более подготовленными начнут они свой профессиональный путь, тем более эффективно смогут отвечать на вызовы будущего. В год 20-летия системного оператора мы рады собраться в стенах гостеприимного Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева и благодарим руководство университета за теплый прием! Я уверена, что доклады, которые мы услышим ближайшие три дня, через несколько лет превратятся в реальные инновации, которых мы ждем в энергетической отрасли!».

Участники конференции представили доклады в семи тематических секциях, посвященных ключевым направлениям развития энергетики. Авторы лучших докладов были отмечены дипломами и получили ценные призы и памятные подарки. Все доклады будут опубликованы в сборнике материалов конференции и направлены в электронную базу российского индекса научного цитирования (РИНЦ), а лучшие из них – в отраслевые научно-технические издания. В рамках программы конференции молодые специалисты и будущие энергетики посетили ключевые предприятия энергетического комплекса региона: подстанцию 110/10 кВ «Стрелка», подстанцию 500 кВ «Нижегородская», подстанцию 220 кВ «Заречная» и Автозаводскую ТЭЦ. Студенты НГТУ встретились с представителями АО «СО ЕЭС» и Нижегородского ПМЭС, познакомились с молодежной политикой, обсудили требования к выпускникам вузов и перспективы профессионального развития молодых специалистов в компаниях.

По традиции конференция завершилась церемонией передачи эстафеты представителю руководства вуза, на базе которого состоится следующая конференция. Директор института электроэнергетики НГТУ им. Р.Е. Алексеева Андрей Дарьенков передал символы конференции – флаг и рюкзак с материалами конференции – директору Политехнического института Сибирского федерального университета Михаилу Первухину.

«В Красноярске есть все для успешного проведения конференции: современный университет с развитой инфраструктурой, мощный энергетический комплекс, талантливая молодежь и высококвалифицированные специалисты. И мы приложим все усилия, чтобы удерживать высокую планку в организации конференции, которая была установлена нижегородским государственным техническим университетом. Всех участников приглашаю на следующую конференцию. До встречи осенью 2023 года в Красноярске!», – сказал **Михаил Первухин**, принимая эстафету конференции от имени СФУ.

В выпуске № 1 (17) за 2022 г. в статье «Алгоритм расчета переходных процессов электрических цепей методом переменных состояния», авторы: А.С. Корнев, С.И. Вольский, И.П. Викулов, Н.В. Кузнецов, Д.А. Сорокин, на с. 108, допущена ошибка в записи формулы переходной матрицы состояния системы. Матрица состояния системы должна быть записана в виде:

$$e^{At} = \begin{pmatrix} (0,5 + j0,025)e^{p_1 t} + & j5 \cdot 10^{-5} e^{p_1 t} - j5 \cdot 10^{-5} e^{p_2 t} \\ +(0,5 - j0,025)e^{p_2 t} & \\ -j500e^{p_1 t} + j500e^{p_2 t} & (0,5 - j0,025)e^{p_1 t} + (0,5 + j0,025)e^{p_2 t} \end{pmatrix}.$$

.....

Приступая к вычислению интеграла, можно записать:

$$\int_0^t \begin{pmatrix} (0,5 + j0,025)e^{-p_1 \tau} + & j5 \cdot 10^{-5} e^{-p_1 \tau} - j5 \cdot 10^{-5} e^{-p_2 \tau} \\ +(0,5 - j0,025)e^{-p_2 \tau} & \\ -j500e^{-p_1 \tau} + j500e^{-p_2 \tau} & (0,5 - j0,025)e^{-p_1 \tau} + \\ & +(0,5 + j0,025)e^{-p_2 \tau} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 2000 \sin \omega \tau \\ 0 \end{pmatrix} d\tau =$$

$$= \begin{pmatrix} (1000 + j50) \int_0^t e^{-p_1 \tau} \sin \omega \tau d\tau + (1000 - j50) \int_0^t e^{-p_2 \tau} \sin \omega \tau d\tau \\ -j1 \cdot 10^6 \int_0^t e^{-p_1 \tau} \sin \omega \tau d\tau + j1 \cdot 10^6 \int_0^t e^{-p_2 \tau} \sin \omega \tau d\tau \end{pmatrix}.$$

Далее по тексту.

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

SMART ELECTRICAL ENGINEERING

№ 2

Nizhny Novgorod 2022

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:

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)
Anatoly Viktorovich Kuznetsov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair USTU (Ulyanovsk, 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)
Georgy Borisovich Onishchenko	Doctor of technical sciences, professor, scientific director LLC «STC Drive Technique» (Moscow, 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)
Vitezslav Styskala	Dr. Ing., Ph. D., associate professor VSB – Technical University of Ostrava (Ostrava-Poruba, Czech Republic)
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)
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., professor H-BRS (Germany)

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

ISSN 2658-6754

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

© Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev, 2022

CONTENT

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS	4
A.A. Popov, G.B. Onishchenko, I.V. Gulyaev. Analysis of performance of control system for squirrel-cage induction motor with optimization for minimum of stator current.....	4
Q.Q. Ngo, V.N. Nguyen, V.N. To, V.K. Nguyen, T.S. Luong, T.Ph. Doan, M.T. Pham, T.T. Nguyen. Production of solid electrolyte $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ for sodium-ion battery.....	16
E.N. Menshov. Representation of the Poynting vector via electrical characteristics of electrical systems. Part 2. Simulation of current density.....	30
V.I. Livshits. A discovery of electromagnetic rotations in distributed inductive-capacitive structures and the new direction in electromechanics ...	46
POWER INDUSTRY.....	80
L.A. German, K.S. Subkhanverdiev. Calculation of 25 kV traction power supply system by RAST-05K program taking into account mutual induction of traction networks.....	80
N.L. Novikov, R.B. Zhalilov, A.N. Novikov. Development of real-time control systems for complete transformer substations 6-10/0.4 kV.....	94
Yu.I. Zharkov, N.A. Popova, E.P. Figurnov. Safety control methods for railway power transmission lines with voltage up to 35 kV.....	111
E.K. Lochanin. To the question of simulation of synchronous and asynchronized synchronous machines in calculations of steady and transient modes of energy systems	122
CHRONICLE.....	132
XII International scientific and technical conference «Electric power industry in the eyes of youth».....	132

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 2

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

Редакция:

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24
smart_electric@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать 20.06.2022. Дата выхода в свет: 28.06.2022

Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 7,3. Тираж 100 экз. Заказ .

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

Адрес типографии:

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24