

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

# **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

**№ 4**

**Нижний Новгород 2023**

**УДК 621.3**  
**ББК 31.2**

**Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2023. № 4 (24). – 126 с.**

*Выходит 1 раз в квартал*

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

**Главный редактор**

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

**зам. гл. редактора**

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

**отв. секретарь**

Андрей Владимирович Шалухо канд. техн. наук

**отв. редактор**

Валерия Игоревна Казакова канд. филос. наук, доцент

**выпускающий редактор**

Иван Алексеевич Липужин канд. техн. наук

**ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:**

Даурен Садыкович Ахметбаев	д-р техн. наук (Казахстан)
Геннадий Яковлевич Вагин	д-р техн. наук, профессор
Леонид Абрамович Герман	д-р техн. наук, профессор
Валерий Геннадьевич Гольдштейн	д-р техн. наук, профессор
Игорь Васильевич Гуляев	д-р техн. наук, профессор
Павел Владимирович Илюшин	д-р техн. наук
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»

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

*Электронная версия журнала:*  
<https://ie.nttu.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, 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ .....</b>	<b>4</b>
<b>Дергачев П.А., Венцеров М.С., Астафьев В.В.</b> Моделирование потерь в пазовой части обмотки статора турбогенератора с транспозицией элементарных проводников.....	4
<b>Данилов А.Д., Ширяев Д.А., Зимин А.И., Волков Д.М.</b> Диагностика турбогенераторов большой мощности методом спектрального анализа токов статора.....	18
<b>Алешин Д.А., Шалухо А.В., Ешаев М.К., Петухов Н.М.</b> Разработка испытательного стенда и исследование характеристик серийно выпускаемых аккумуляторных батарей.....	31
<b>Савчук В.С., Плехов А.С.</b> Управление сварочным инвертором для электросварки труб высокого давления.....	43
<b>Абузаров Т.Х., Дарьенков А.Б.</b> Экспериментальное исследование двойной инверторной системы в составе шагового электропривода.....	55
<b>Иванов В.М.</b> Алгоритмы управления шаговым электроприводом для контроллера движения.....	65
<b>ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА .....</b>	<b>78</b>
<b>Третьяков Н.К., Кузьменко В.П., Соленая О.А.</b> Моделирование устройства стабилизации напряжения городской электросети постоянного тока.....	78
<b>Федорова В.А., Кириченко В.Ф., Глазырин Г.В.</b> Разработка математической модели для исследования переходных процессов при общем первичном регулировании частоты в энергосистемах.....	90
<b>Серебряков А.С., Семенов Д.А., Сбитнев Е.А., Сидорова А.В.</b> Техническая диагностика главной изоляции силовых трансформаторов. Определение остаточного ресурса.....	108

---

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

---

УДК 621.313.322-81

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_04

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ В ПАЗОВОЙ ЧАСТИ  
ОБМОТКИ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА  
С ТРАНСПОЗИЦИЕЙ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ  
ПРОВОДНИКОВ****П.А. Дергачев**ORCID: 0000-0003-1631-7187 e-mail: [dergachevpava@mpei.ru](mailto:dergachevpava@mpei.ru)

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия***М.С. Венцеров**ORCID: 0009-0004-1467-8733 e-mail: [ventserovms@mpei.ru](mailto:ventserovms@mpei.ru)

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия***В.В. Астафьев**ORCID: 0009-0004-2671-4375 e-mail: [vpp@bk.ru](mailto:vpp@bk.ru)

ООО «ЭР»

*Москва, Россия*

Предложен способ детального анализа электромагнитного состояния пазовой части статора турбогенератора с учетом транспозиции элементарных проводников стержня. Обмотка статора турбогенератора подвергается комплексному влиянию электромагнитных, тепловых, механических и др. факторов на протяжении всего срока эксплуатации, при этом она должна удовлетворять повышенным требованиям по надежности и долговечности, поскольку от нее напрямую зависит работоспособность всего турбоагрегата, подключенного к энергосистеме. В связи с этим обмотка статора является узлом, требующим при проектировании, эксплуатации и ремонте точного понимания происходящих в ней физических процессов. Выполнено численное моделирование пазовой части статора ТФ-63-2У3 при различных вариантах транспозиции, в том числе для стандартных углов 360° и 540°. Показано, что даже при наличии транспозиции присутствует определенная неравномерность плотности токов элементарных проводников, что приводит к возникновению дополни-

тельных электрических потерь. При этом транспозиция на  $540^\circ$  является более предпочтительной, поскольку обеспечивает большую равномерность распределения плотности токов, за счет чего достигается снижение электрических потерь.

**Ключевые слова:** транспозиция, турбогенератор, численное моделирование, электромагнитный расчет.

**Для цитирования:** Дергачев П.А., Венцеров М.С., Астафьев В.В. Моделирование потерь в пазовой части обмотки статора турбогенератора с транспозицией элементарных проводников // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 4. С. 4-17. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_04

## MODELING OF LOSSES IN STATOR WINDINGS SLOT PART OF TURBO GENERATOR WITH TRANSPOSITION OF STRANDS

**P.A. Dergachev**

ORCID: **0000-0003-1631-7187** e-mail: **dergachevpava@mpei.ru**  
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»  
*Moscow, Russia*

**M.S. Ventserev**

ORCID: **0009-0004-1467-8733** e-mail: **ventserovms@mpei.ru**  
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»  
*Moscow, Russia*

**V.V. Astafjev**

ORCID: **0009-0004-2671-4375** e-mail: **vpp@bk.ru**  
ER LTD  
*Moscow, Russia*

**Abstract.** The method of detailed analysis of electromagnetic state of slot part of turbo generator stator taking into account transposition of bar strands is proposed. It should be noted that the stator winding of turbo generator is exposed to a complex influence of electromagnetic, thermal, mechanical and other factors during the whole service life. At the same time, the winding must meet higher requirements for reliability and durability, because it directly affects the performance of the whole turbine unit, connected to the power system. Therefore, the stator winding is a unit that requires correct understanding of physical processes at all stages from designing to operating and repairing. Numerical modeling of slotted part of TF-63-2U3 stator at different transposition variants, including standard angles of  $360^\circ$  and  $540^\circ$  was performed. It is shown that even in the presence of transposition there is a certain non-uniformity of strands current density distribution, which

leads to the appearance of additional electric losses. Transposition at  $540^\circ$  is more preferable, since it provides more uniformity of current density distribution, at the expense of which electric losses are reduced.

**Key words:** transposition, turbo generator, numerical simulation, electromagnetic calculation.

**For citation:** P.A. Dergachev, M.S. Ventserev and V.V. Astafjev, "Modeling of losses in stator windings slot part of turbogenerator with transposition of strands", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 4-17, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_04

## I. Введение

Для преобразования механической энергии турбин в электроэнергию на тепловых и атомных электростанциях применяются крупные турбогенераторы. Мощность современных турбогенераторов может достигать 2 ГВт [1]. Применяемые турбогенераторы имеют очень высокий КПД (98...99 %) [2], однако потери (даже в 1 %) приводят к тепловым нагрузкам, которые требуют специализированных систем охлаждения. Принято различать два способа охлаждения активных частей – прямой (непосредственный) и косвенный. Если речь идет об обмотке статора, непосредственное охлаждение означает, что большая часть выделяемого тепла отводится непосредственно с меди проводника при помощи хладагента, циркулирующего по внутренним каналам. В случае косвенного охлаждения весь тепловой поток проходит через корпусную изоляцию в магнитопровод статора, затем охлаждается сам магнитопровод. Для понимания важности поддержания температуры обмотки статора в допустимом диапазоне можно использовать сильно упрощенное правило (которое используется на практике): превышение температуры на  $8...10^\circ\text{C}$  приводит к двукратному снижению срока службы изоляции [3, 4].

Известно, что отказы обмотки статора, связанные с некачественной изолировкой, перегревом, замыканиями между проводниками, дефектами бандажирующих систем и т.д., являются одной из наиболее распространенных причин отказов всего агрегата [5, 6]. Применение турбогенераторов высокой мощности выгодно с точки зрения удельных капиталовложений, однако при их проектировании упомянутые проблемы требуют особого внимания. Разработка машин повышенной мощности с воздушным охлаждением также представляет большой интерес ввиду упрощения и удешевления эксплуатации, однако ключевой проблемой является повышенная разрядная активность в пазовой и лобовой частях, способная привести к разрушению корпусной изоляции и замыканиям [7]. На сегодняшний день максимальная мощность машин с воздушным охлаждением находится на уровне 350 МВт в России [8] и 500 МВА за рубежом [9].

Необходимо отметить, что обмотка статора является одним из наименее надежных и наиболее важных узлов синхронной электрической машины в целом [10]. Поскольку фаза обмотки состоит из большого числа стержней, измерение, мониторинг и анализ неисправностей на ранней стадии сильно затруднены. Незначительные по размерам повреждения могут быстро развиваться, приводить к коротким замыканиям и к серьезным авариям. Таким образом, методики анализа состояния обмотки статора (как при проектировании, так и при эксплуатации) имеют важное практическое значение.

Помимо детальной оптимизации системы охлаждения, необходимо минимизировать сами потери. Для эффективного их снижения в обмотке статора отдельные стержни делают из набора изолированных проводников с транспозицией этих проводников в пазовой части (в последнее время используют транспозицию и в пазовой, и в лобовой частях).

При протекании переменного тока по проводнику плотность тока в проводнике перераспределяется в силу собственного магнитного поля и магнитного поля от соседних проводников с токами, что характеризуется глубиной проникновения электромагнитного поля и связано с наложением индуцированной напряженности электрического поля от изменяющихся магнитных полей. Для выравнивания распределения плотности тока по сечению стержня его разделяют на изолированные проводники с их последующей транспозицией. Неоднородность индуцированной напряженности электрического поля по высоте паза и от магнитного поля, создаваемого токами в стержнях, увеличивает неоднородность плотности токов в них. Таким образом, параметры транспозиции (угол транспозиции, количество и размеры проводников) влияет на эффективность снижения потерь. Надежные оценки значений потерь могут быть получены только на основе трехмерных численных моделей. Практическая значимость результатов моделирования связана с применением оптимальных параметров транспозиции для снижения потерь как в новых турбогенераторах, так и при их ремонте с заменой обмотки статора.

Основными видами транспозиции в пазовой части являются транспозиция на  $360^\circ$ , при которой каждый проводник занимает все возможные положения в пазу один раз, и транспозиция на  $540^\circ$ , при которой каждый проводник занимает все возможные положения в пазу полтора раза. Дополнительно может выполняться транспозиция в лобовых частях на  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $360^\circ$ .

В [11, 12] подробно рассмотрен характер влияния способа плетения на степень снижения потерь. В приведенном анализе, а также в используемых на сегодняшний день методиках проектирования принято, что при углах  $360^\circ$  и  $540^\circ$  потери, вызванные полем пазового рассеяния, снижаются до

нуля. Для дальнейшего исследования необходимо построение трехмерных моделей стержней для более полного понимания происходящих в них процессов и возможности дальнейшей оптимизации геометрии с целью минимизации потерь. Численное моделирование является эффективным инструментом для анализа физических процессов, происходящих в активной зоне турбогенератора, что подтверждается растущим числом работ, посвященных данной теме [13-15].

## II. Моделирование электромагнитного состояния стержня при нагрузке

Моделирование выполняется с применением программного пакета для численного анализа *COMSOL Multiphysics*.

В качестве объекта исследований был выбран турбогенератор ТФ-63-2У3 (активная мощность 63 МВт, частота вращения 3000 об/мин, с косвенным воздушным охлаждением обмотки статора). Построены две расчетные модели – 2D-модель, используемая для расчета поля в сечении активной зоны агрегата (рис. 1), и 3D-модель, позволяющая более детально оценить эффекты в пазовой части, связанные с транспозицией (рис. 2).

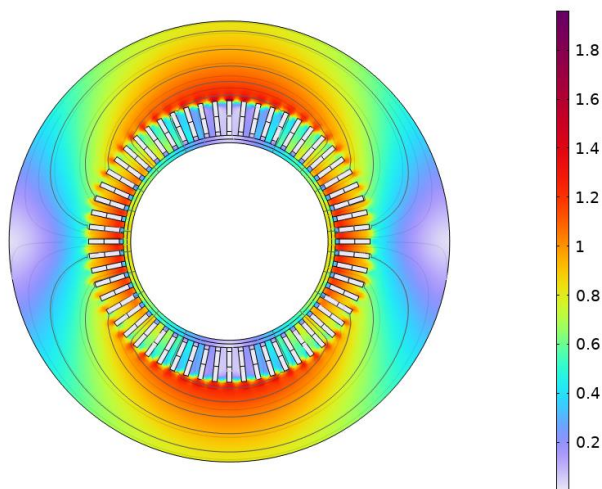
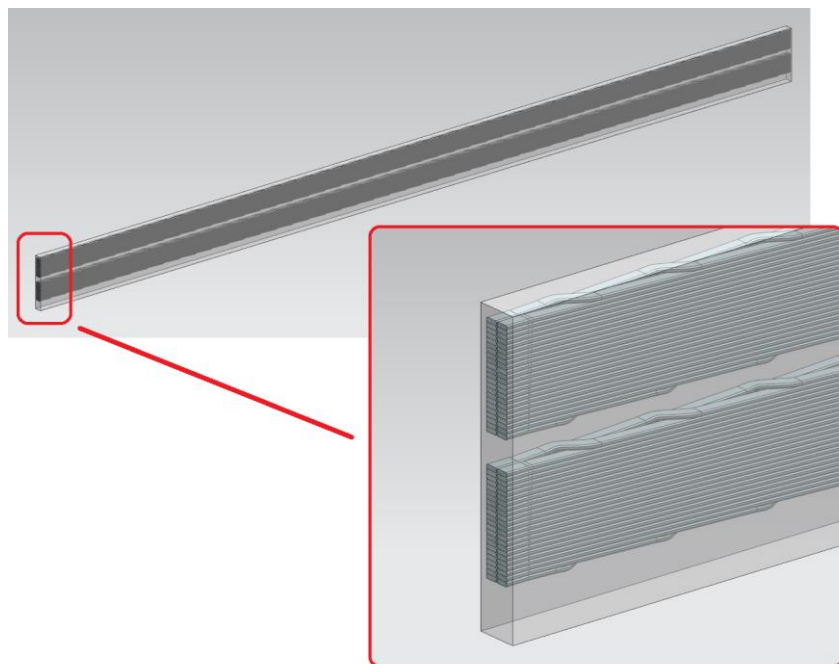


Рис. 1. 2D-модель активной зоны турбогенератора ТФ-63-2У3 (холостой ход). Цветовая шкала отражает распределение модуля вектора магнитной индукции  $B$ , Т

Fig. 1. 2D-model of the active domain of turbo generator TF-63-2U3 (idling). The color scale reflects the distribution of the magnetic induction vector  $B$ , T



В двумерной модели реальный ротор заменен на гармонически распределенную по внутренней поверхности функцию векторного магнитного потенциала  $A_z$ , вращающуюся при изменении времени аналогично вращению ротора. Используемая функция  $A_z$  получена из предварительного расчета модели с реальным ротором. Такой подход позволяет значительно сократить время расчета за счет снижения числа степеней свободы и отсутствия необходимости перестроения сетки при повороте ротора.

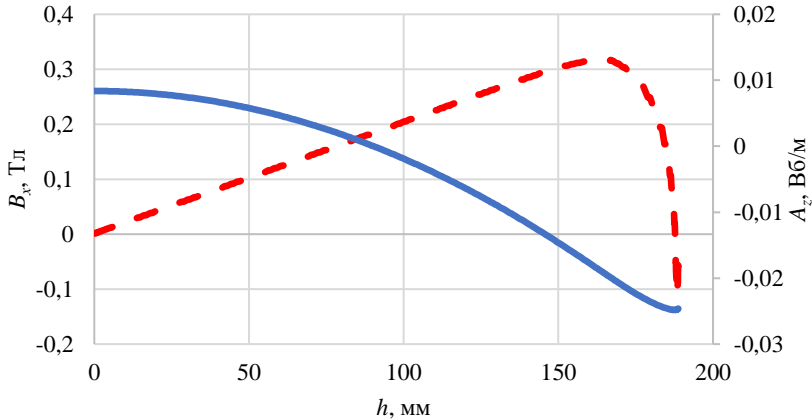


**Рис. 2. 3D-модель пазовой части стержня обмотки статора ТФ-63-2У3 с учетом транспозиции элементарных проводников**

**Fig. 2. 3D model of slot part of stator winding bar TF-63-2U3 taking into account transposition of strands**

Для оценки распределения полей на холостом ходу достаточно использовать стационарное решение при различных положениях ротора. По результатам расчета обнаруживается неравномерность распределения поля в пазу статора, которая влечет за собой неравномерность индуцированных ЭДС в элементарных проводниках. В дальнейшем удобнее всего продолжать работать с векторным магнитным потенциалом  $A_z$ , поскольку его

функции имеют более гладкий вид (следовательно, проще аппроксимируются), чем функции магнитной индукции  $B$  (рис. 3).



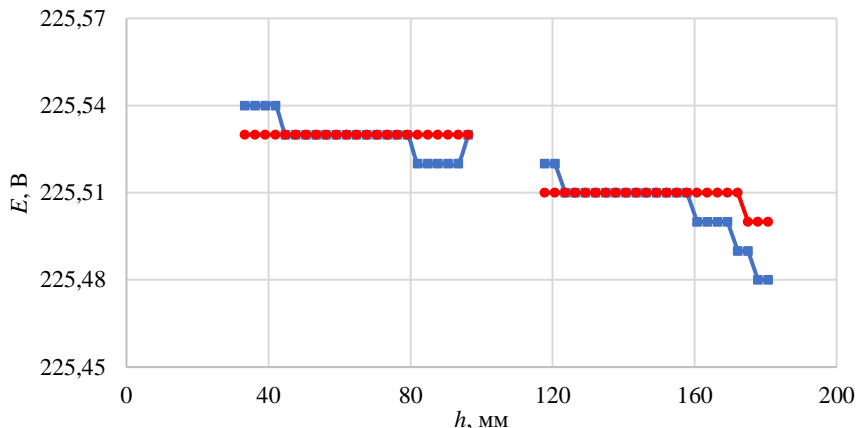
**Рис. 3.** Распределение величин поля  $B_x$  (пунктирная линия) и  $A_z$  (сплошная линия) по высоте паза статора

**Fig. 3.** Distribution of  $B_x$  (dashed line) and  $A_z$  (solid line) field values along the stator slot height

Полученные зависимости распределения  $A_z$  по границам паза аппроксимируются подходящей функцией (обычно это полиномы 2-го – 4-го порядков либо экспоненциальные функции) и задаются в трехмерную модель на стенки паза в качестве граничных условий. Трехмерная модель решается в частотной области (т.е. с использованием комплексного анализа гармонически изменяющихся во времени величин [16]). По результатам расчета определяются индуцированные ЭДС в выбранных элементарных проводниках, расположенных на разной высоте паза. На рис. 4 приведено сравнение ЭДС при наличии транспозиции на  $360^\circ$  и при ее отсутствии. На графике (рис. 4) можно наблюдать эффект снижения неравномерности ЭДС при наличии транспозиции, что подтверждает эффективность ее применения для снижения потерь.

При моделировании режима нагрузки распределение поля в пазу, очевидно, изменится, поэтому необходимо вернуться к 2D-модели. Моделирование работы генератора при нагрузке возможно путем реализации нестационарного расчета, однако это занимает определенное количество времени. Альтернативным способом является моделирование в частотной области. Время расчета при такой постановке сокращается на порядок, а в постобработке сразу получается установившееся решение с учетом ЭДС и индуцированных токов. Более того, интересующие величины получаются в

комплексной форме, что упрощает их передачу в трехмерную модель (которая, как было сказано выше, также решается в частотной области).



**Рис. 4. Сравнение индуцированных ЭДС в элементарных проводниках, расположенных на различной высоте паза:**  
 ■ – при отсутствии транспозиции; ● – при транспозиции

**Fig. 4. Comparison of induced EMF in elementary conductors located at different slot heights:**  
 ■ – without transposition; ● - with transposition

В трехмерной модели, помимо задания поля на границах, необходимо также учесть напряжение, подводимое к рассматриваемому стержню из сети. В постобработке можем получить как сосредоточенные параметры токов каждого элементарного проводника (на рис. 5 приведено сравнение токов в проводниках, расположенных на разной высоте паза, при наличии транспозиции на  $360^\circ$  и при наличии транспозиции на  $540^\circ$ ), так и паттерны плотности тока (рис. 6). Очевидно, что транспозиция на  $540^\circ$  позволяет достичь большей равномерности токов, чем на  $360^\circ$ . Верхний график (рис. 5) соответствует действительным значениям, нижний соответствует мнимым значениям. Суммарное значение токов проводников сходится с фазным током из 2D-модели (4,1 кА), при этом можно наблюдать различную степень неравномерности токов в проводниках, вследствие чего различается величина суммарных электрических потерь в проводниках (3576 Вт при  $360^\circ$  и 3158 Вт при  $540^\circ$ ).

Важно отметить, что предложенные трехмерные модели являются высокоаспектными (поскольку длина пазовой части заметно больше ее ширины и высоты), что вкпе со сложной геометрической структурой транс-

позиции приводит к необходимости использования сложной сетки с большим числом степеней свободы (около 5-8 млн). Это обуславливает высокие требования к оперативной памяти используемого компьютера (не менее 256 Гб). Возможной альтернативой является использование т.н. «проволочной» модели, в которой элементарные проводники моделируются в виде бесконечно тонких «проволок» (рис. 7).

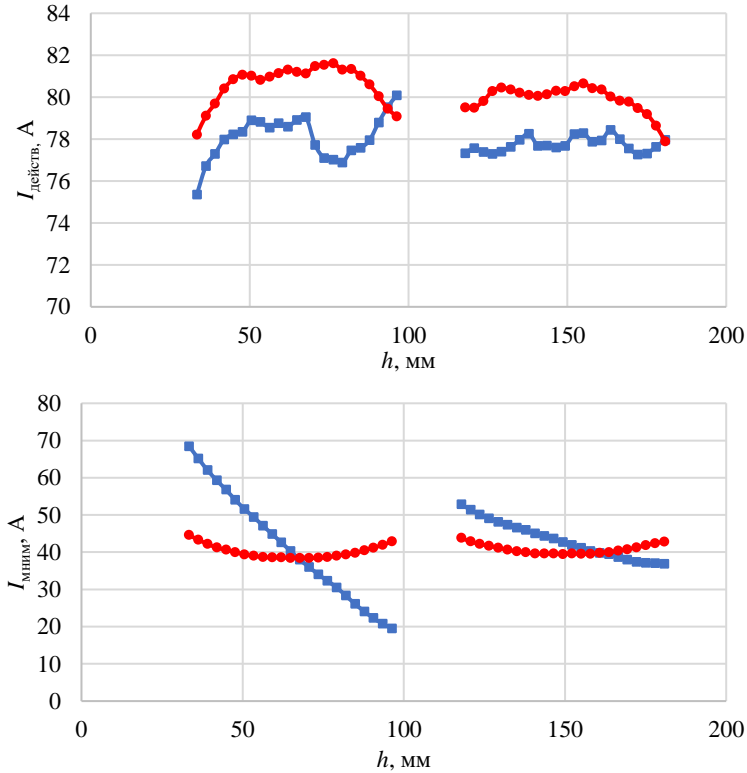


Рис. 5. Сравнение токов в проводниках, расположенных на разной высоте паза при транспозиции:

■ – на  $360^\circ$ ; ● – на  $540^\circ$

Fig. 5. Comparison of currents in strands located at different height of the slot with transposition:

■ – at  $360^\circ$ ; ● – at  $540^\circ$

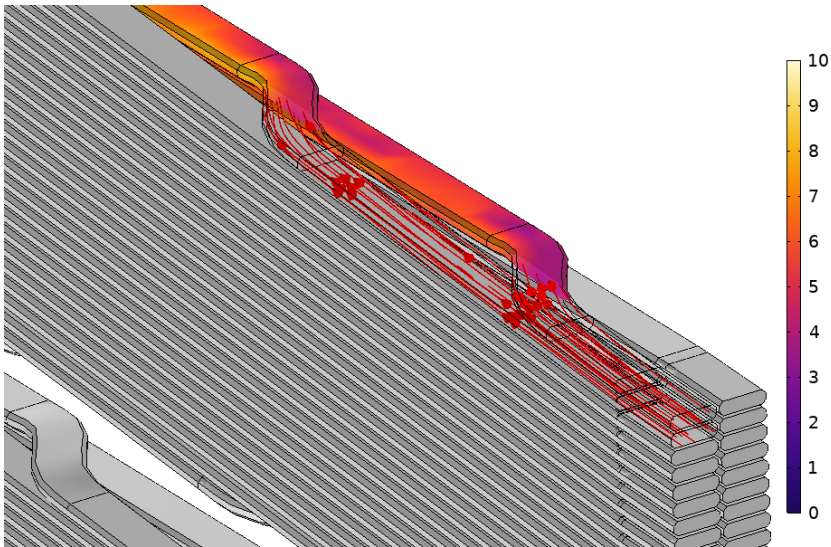
При работе с твердыми телами можно использовать встроенные функции программы, позволяющие автоматически рассчитывать сосредоточенные параметры для каждого проводника. При работе с одномерными «проводами» функционал несколько ограничивается, однако можно записать для каждого проводника уравнение вида [17]:

$$U = I \cdot R - \frac{d\psi}{dt},$$

где  $U$  – подводимое напряжение,  $I$  – ток проводника,  $R$  – активное сопротивление проводника,  $\psi$  – потокосцепление, учитывающее как внешнее поле (поля возбуждения и поле от соседних проводников), так и собственное поле проводника:

$$\psi = \int_L \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l},$$

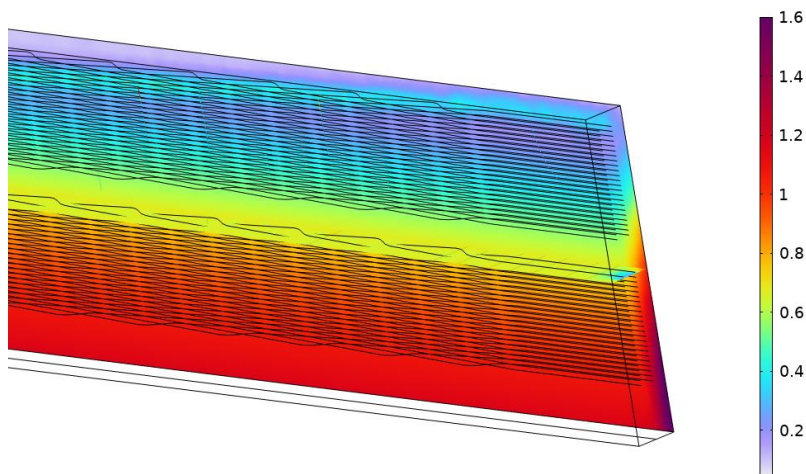
где  $\mathbf{A}$  – векторный магнитный потенциал.



**Рис. 6. Картина плотности тока  $J$ , представленная в виде цветовой карты (шкала значений модуля плотности тока в  $\text{A}/\text{mm}^2$ ) и в виде силовых линий плотности тока**

**Fig. 6. Current density picture  $J$ , presented as a color map (scale of current density modulus values in  $\text{A}/\text{mm}^2$ ) and as current density power lines**

Такая модель значительно сокращает требования к оперативной памяти (можно использовать компьютер с 8 Гб ОЗУ), при этом она также позволяет получить сосредоточенные и распределенные параметры. Однако подобные упрощения исключают возможность оценки некоторых эффектов (например, «скин-эффект» в сечении проводника).



**Рис. 7. Упрощенная 3D-модель стержня с транспозицией. Цветовая шкала отражает распределение модуля вектора магнитной индукции  $B$ , Т**

**Fig. 7. Simplified 3D model of the bar with transposition. The color scale reflects the distribution of the modulus of the magnetic induction vector  $B$ , T**

Предложенная методика может быть использована для оптимизации стержней новых турбогенераторов и для оптимизации стержней турбогенераторов при капитальном ремонте с целью повышения надежности за счет снижения тепловых нагрузок и как следствие снижения рабочих температур.

### III. Заключение

Предложен способ детального анализа электромагнитного состояния стержня обмотки статора турбогенератора с учетом текущего режима работы турбогенератора.

Приведены результаты моделирования состояния стержня турбогенератора ТФ-63-2У3 с учетом транспозиции проводников, показана неравномерность токов при нагрузке. Показано, что транспозиция на  $540^\circ$  позволяет достичь более равномерного распределения токов и, как следствие, бо-

лее низкого тепловыделения, чем на 360°, в связи с чем является более предпочтительной (однако не всегда возможной в связи с ограниченной длиной проводника).

© Дергачев П.А., 2023

© Венцеров М.С., 2023

© Астафьев В.В., 2023

*Поступила в редакцию 16.05.2023*

*Принята к публикации 25.05.2023*

*Received 16.05.2023*

*Accepted 25.05.2023*

### Библиографический список

- [1] Sedlazeck K., Richter C., Strack S., Lindholm S., Pipkin J., Fu F., Humphries B., Montgomery L. Type testing a 2000 MW turbogenerator // 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, May 03-06, 2009, Miami, FL, USA: IEEE, 2009. P. 465-470. DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075247
- [2] Извеков В.И., Серихин Н.А., Абрамов А.И. Проектирование турбогенераторов. М.: Издательство МЭИ, 2005. – 440 с.
- [3] Stone G., Culbert I., Boulter E.A., Dhirani H. Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair. Wiley, IEEE Press Series on Power Engineering, 2014.
- [4] Мантров М.И. Расчет изоляции электрических машин. М.: МЭИ, 1964. – 111 с.
- [5] Самородов Ю.Н. Причины и последствия аварий и отказов турбогенераторов // Энергия единой сети. 2014. № 2 (13). С. 70-80.
- [6] Самородов Ю.Н. Дефекты генераторов. М.: ЗАО «Энергетические технологии», 2005. – 350 с.
- [7] Kerszenbaum I., Klempner G. Large turbo-generators: Malfunctions and symptoms. Boca Raton: CRC Press, 2016 – 586 p.
- [8] Силовые машины // Турбогенераторы. [Электронный ресурс]. URL: <https://power-m.ru/customers/thermal-power/turbogenerators/> (дата обращения 03.05.2023)
- [9] Joho R. Type-tested air-cooled turbo-generator in the 500 MVA range // CIGRE, 2000.
- [10] Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
- [11] Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. Л.: «Энергия», 1974 – 504 с.
- [12] Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А., Вартаньян Г.П., Заславский Д.И., Смотров И.А. Турбогенераторы. Расчет и конструкция. Л.: «Энергия», 1967. – 895 с.
- [13] Кади-Оглы Е.Ф., Шуваев И.Н. Моделирование электромагнитного поля стержневой обмотки статора электрических машин с различными типами транспозиции

- проводников // Электрические станции. 2022. № 11. С. 46-51. DOI: <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.1096.11.006>
- [14] Маннанов Э.Р., Филин А.Г. Тепловое состояние электрической изоляции стартовых обмоток турбогенераторов с воздушным охлаждением // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27. № 2. С. 38-49. DOI: 10.18721/JEST.27203
- [15] Ryzhov V.V., Molokanov O.N., Dergachev P.A., Osipkin S.V., Kurbatova E.P., Kurbatov P.A. Three-dimensional mathematical simulation of the stator slot of a turbogenerator, including thermal modeling and flow fluid dynamics // 2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Jul. 01-04, 2021, Sofia, Bulgaria: IEEE, 2021. P. 1-4. DOI: 10.1109/ELMA52514.2021.9502987
- [16] COMSOL Multiphysics // Guide to Frequency Domain Wave Electromagnetics Modeling [Электронный ресурс] URL: <https://www.comsol.com/blogs/guide-to-frequency-domain-wave-electromagnetics-modeling> (дата обращения 18.01.2023).
- [17] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1978. – 528 с.

### References

- [1] K. Sedlazeck, C. Richter, S. Strack, S. Lindholm, J. Pipkin, F. Fu, B. Humphries and L. Montgomery, “Type testing a 2000 MW turbogenerator”, in proc. *2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, May 03-06, 2009, Miami, FL, USA, pp. 465-470. DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075247
- [2] V.I. Izvekov, N.A. Serikhin and A.I. Abramov, *Projectirovanie turbogeneratorov: ucheb. posobie dlya vuzov [Design of turbo generators: textbook for universities]*. Moscow: MPEI Publishing House, 2005 (in Russian).
- [3] G. Stone, L. Culbert, E.A. Boulter and H. Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. Wiley, IEEE Press Series on Power Engineering, 2014.
- [4] M.I. Mantrov, *Raschet izolyacii elektricheskikh mashin [Calculation of Insulation of Electrical Machines]*. Moscow: MPEI, 1964 (in Russian).
- [5] Y.N. Samorodov, “The causes and consequences of accidents and failures of turbogenerators”, *Energy of Unified Grid*, vol. 2, no. 13, pp. 70-80, Apr.-May 2014.
- [6] Y.N. Samorodov, *Defecty generatorov [Defects of generators]*. Moscow: CJSC “Energeticheskie tekhnologii”, 2005 (in Russian).
- [7] I. Kerszenbaum and G. Klempner, *Large turbo-generators: Malfunctions and symptoms*. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [8] Turbogeneratory [Turbo generators]. [Online]. Available at: <https://power-m.ru/customers/thermal-power/turbogenerators/> [Accessed: May 3, 2023] (in Russian).
- [9] R. Joho, “Type-tested air-cooled turbo-generator in the 500 MVA range”, *CIGRE*, 2000.
- [10] N.L. Kuznetsov, *Nadejnost elektricheskikh mashin [Reliability of electrical machines]*. Moscow: MPEI Publishing House, 2006 (in Russian).
- [11] V.V. Dombrovsky and G.M. Khutoretsky, *Osnovy projectirovaniya elektricheskikh mashin peremennogo toka [Fundamentals of Designing Alternating Current Electrical Machines]*. Leningrad: “Energia”, 1974 (in Russian).



- [12] V.V. Titov, G.M. Khutoretsky, G.A. Zagorodnaya, G.P. Vartanyan, D.I. Zaslavsky and I.A. Smotrov, *Turbogenerator. Raschet i konstruykcia [Turbogenerators. Calculation and design]*. Leningrad: "Energiya", 1967 (in Russian).
- [13] E.F. Kadi-Ogly and I.N. Shuvaev, "Simulation of electromagnetic field of stator winding bars with different types of strands transposition", *Electrical Stations*, no. 11, pp. 46-51, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.1096.11.006>
- [14] E.R. Mannanov and A.G. Filin, "Electrical insulation thermal state of turbine generators stator windings with air-cooling", *Materials Science. Power Engineering*, vol. 27, no. 2, pp. 38-49, 2021. DOI: 10.18721/JEST.27203
- [15] V.V. Ryzhov, O.N. Molokanov, P.A. Dergachev, S.V. Osipkin, E.P. Kurbatova and P.A. Kurbatov, "Three-dimensional mathematical simulation of the stator slot of a turbogenerator, including thermal modeling and flow fluid dynamics", in proc. *2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, Jul. 01-04, 2021, Sofia, Bulgaria, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ELMA52514.2021.9502987
- [16] Guide to Frequency Domain Wave Electromagnetics Modeling. [Online]. Available at: <https://www.comsol.com/blogs/guide-to-frequency-domain-wave-electromagnetics-modeling> [Accessed: Jan. 18, 2023].
- [17] L.A. Bessonov, *Theoreticheskie osnovy electrotekhniki: Electrichekieskie cepi [Theoretical Foundations of Electrical Engineering: Electrical Circuits]*. Moscow: Higher School, 1978 (in Russian).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Дергачев Павел Андреевич**, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация.

**Pavel A. Dergachev**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation.

**Венцеров Михаил Сергеевич**, магистрант Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация.

**Mikhail S. Ventserev**, graduate student of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation.

**Астафьев Владимир Викторович**, советник генерального директора ООО «ЭР», г. Москва, Российская Федерация.

**Vladimir V. Astafyev**, CEO advisor of the ER LTD, Moscow, Russian Federation.

УДК 621.311.25

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_18

## ДИАГНОСТИКА ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ТОКОВ СТАТОРА

**А.Д. Данилов**

ORCID: 0000-0002-1534-5285 e-mail: [danilov-ad@yandex.ru](mailto:danilov-ad@yandex.ru)

Воронежский государственный технический университет  
*Воронеж, Россия*

**А.И. Зимин**

ORCID: 0000-0002-1532-672X e-mail: [ziminai@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:ziminai@nvnpp1.rosenergoatom.ru)  
АО «Концерн Росэнергоатом». Филиал «Нововоронежская атомная станция»  
*Нововоронеж, Россия*

**Д.А. Ширяев**

ORCID: 0009-0006-7553-7736 e-mail: [shiryaevda@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:shiryaevda@nvnpp1.rosenergoatom.ru)  
АО «Концерн Росэнергоатом». Филиал «Нововоронежская атомная станция»  
*Нововоронеж, Россия*

**Д.М. Волков**

e-mail: [volkovdm@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:volkovdm@nvnpp1.rosenergoatom.ru)  
АО «Концерн Росэнергоатом». Филиал «Нововоронежская атомная станция»  
*Нововоронеж, Россия*

Широкое применение реакторов ВВЭР-1200 в мировой энергетике ставит задачу повышения их надежности и эксплуатационной безопасности. Основным требованием при этом является референтность блоков, а также наличие всех постфукусимских требований по обеспечению безопасности энергоблоков поколения 3+. В связи с этим рассматривается проблема обработки и глубокого анализа данных электрических параметров турбогенератора, которая является одной из основных в виду большого объема информации и сложности получения нужного результата без участия оператора. Запуск регистраторов аварийных событий происходит при достижении контролируемой величины заданного значения, либо осуществляется запись всего процесса работы, но с очень большим временем дискретизации. За время эксплуатации турбогенераторов известны случаи серьезных аварий, которые привели к финансовым потерям и невыработке электрической энергии. Современные системы контроля и диагностики генераторов являются неотъемлемой частью обслуживания, без которого невозможна эксплуатация атомной электростанции. В настоящее время широко применяются методы диагностики электродвигателей, которые сформированы на проведении отслеживания и оценки потребляемого тока, с дальнейшим проведением спектрального анализа полученной информации. Данный

вид анализа позволяет с высокой вероятностью определить вид, тип и характер повреждения оборудования, как в механической, так и в электрической части. При таком способе диагностики предметом изучения являются гармонические составляющие в токах статора. Данный вид наблюдений особенно актуален для турбогенераторов большой мощности.

В настоящее время на энергоблоках последнего поколения с реакторными установками типа ВВЭР-1200 не применяется в полной мере спектральный анализ токов турбогенератора, отсутствует системный подход к обработке полученных результатов в течение длительного периода. Для воплощения в жизнь этой важной функции диагностики и полноценной обработки результатов необходимо создать методику, которая позволит в полном объеме оценить состояние турбогенератора в процессе работы. От состояния турбогенератора напрямую зависит уровень безопасности атомной электростанции и количество выработанной электроэнергии. Данная проблема особенно актуальна в настоящее время, так как увеличивается межремонтный период энергоблоков с реакторными установками типа ВВЭР-1200 с одного года до полутора лет. С помощью качественной диагностики, когда оборудование находится в работе, можно сформировать новый подход к организации технического обслуживания и планированию затрат на плановый ремонт энергоблоков.

**Ключевые слова:** диагностика, осциллограмма, регистратор, спектральный анализ, турбогенератор, энергоблок.

**Для цитирования:** А.Д. Данилов, А.И. Зимин, Д.А. Ширяев, Д.М. Волков. Диагностика турбогенераторов большой мощности методом спектрального анализа токов статора // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 4. С. 18-30. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_18

## **DIAGNOSTICS OF HIGH-POWER TURBO GENERATORS BY THE METHOD OF SPECTRAL ANALYSIS OF STATOR CURRENTS**

**A.D. Danilov**

ORCID: **0000-0002-1534-5285** e-mail: **danilov-ad@yandex.ru**  
Voronezh State Technical University  
*Voronezh, Russia*

**A.I. Zimin**

ORCID: **0000-0002-1532-672X** e-mail: **ziminai@nvnpp1.rosenergoatom.ru**  
JSC "Rosenergoatom". Novovoronezh Nuclear Power Plant  
*Novovoronezh, Russia*

**D.A. Shiryaev**

ORCID: **0009-0006-7553-7736** e-mail: **Shiryaevda@nvnpp1.rosenergoatom.ru**  
JSC "Rosenergoatom". Novovoronezh Nuclear Power Plant  
*Novovoronezh, Russia*

**D.M. Volkov**

e-mail: volkovdm@nvnpp1.rosenergoatom.ru  
JSC “Rosenergoatom”. Novovoronezh Nuclear Power Plant  
*Novovoronezh, Russia*

**Abstract:** The widespread use of VVER-1200 reactors in the global energy sector poses the task of increasing their reliability and operational safety. The main requirement in this case is the referency of the blocks, as well as the presence of all post-Fukushima requirements to ensure the safety of generation 3+ energy blocks. In this regard, the article deals with the problem of processing and in-depth analysis of the data of the electrical parameters of the turbo generator, which is one of the main ones in view of the large amount of information and the complexity of obtaining the desired result without the participation of the operator. The launch of the emergency event recorders occurs when the controlled value of the set value is reached, or the entire operation process is recorded, but with a very long sampling time. There have been cases of serious accidents that have led to financial losses and under-production of electrical energy during the operation of turbo generators. Modern control and diagnostic systems of generators are an integral part of the equipment, without which the operation of nuclear power plants is not possible. To date, methods of diagnostics of electric motors are widely used, which are formed on tracking and evaluating the current consumed, with further spectral analysis of the information received. This type of analysis makes it possible to determine with high probability the type and nature of equipment damage, both in the mechanical and electrical parts. The harmonic components in the stator currents are the subject of study in this method of diagnosis. This type of observation is especially relevant for high-power turbo generators.

At present, the spectral analysis of turbogenerator currents is not fully applied on the power units of the latest generation with the VVER-1200 type reactor plant, or rather, there is no systematic approach to processing the results obtained over a long period. In order to implement this important diagnostic function and fully process the results, it is necessary to create a methodology that will allow to fully assess the condition of the turbo generator during operation. The safety level of the nuclear power plant and the amount of electricity generated directly depends on the condition of the turbo generator. This problem is particularly relevant at the present time, as the inter-repair period of power units with a VVER-1200-type reactor plant increases from one year to one and a half years. It is possible to form a new approach to the organization of maintenance and cost planning for the planned repair of power units using high-quality diagnostics for equipment is in operation.

**Keywords:** diagnostics, oscillogram, recorder, spectral analysis, turbogenerator, power unit.

**For citation:** A.D. Danilov, A.I. Zimin, D.A. Shiryayev and D.M. Volkov, “Diagnostics of high-power turbo generators by the method of spectral analysis of stator currents”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 18-30, 2023.  
DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_18

## **I. Введение**

Основная цель данной статьи заключается в проведении анализа имеющихся систем и защит турбогенератора на энергоблоках Нововоронежской (НВ) атомной электростанции (АЭС) с реакторами типа ВВЭР-1200, которые способны сигнализировать о его состоянии в процессе эксплуатации, а также сформировать представление о достаточности применяемых методик исследования.

В типовом проекте НВ АЭС-2 применен шестифазный генератор с двумя статорными обмотками, сдвинутыми друг относительно друга на угол 30 электрических градусов. В блоке с генератором установлен повышающий блочный трансформатор, состоящий из группы трех однофазных трансформаторов, обмотки которых соединены в трехфазную группу.

Линейные выводы трехфазных составляющих шестифазной обмотки статора посредством пофазно-экранированных воздушных токопроводов подключены через генераторные выключатели к обмоткам низкого напряжения блочного трансформатора, образуя две генераторные цепи.

Для реализации 100 %-ой защиты (с наложением 20 Гц) обмоток статора генератора от замыканий на землю проектом предусмотрено высокоомное резистивное заземление нейтрали сети генераторного напряжения. Оборудование заземления нейтрали установлено для каждой из генераторных цепей и включает в свой состав группы из трех однофазных трансформаторов и резисторов в их вторичных цепях. Первичные обмотки трансформаторов подключаются пофазно к соответствующим фазам обмоток статора. Вторичные обмотки трансформаторов собраны по схеме разомкнутого треугольника, к выводам которого подключен резистор [1].

Энергоблок подключается к элегазовому комплектному распределительному устройству (КРУЭ) 500 кВ посредством пофазно-экранированных элегазовых токопроводов.

Для каждого защищаемого элемента проектом предусмотрено по два независимых комплекта защит (100 % резервирование по основным защитным функциям) с действием по схеме «ИЛИ». Дополнительно для рабочих трансформаторов среднего напряжения предусмотрен комплект резервных защит.

## **II. Диагностика турбогенераторов**

Диагностика турбогенераторов методом спектрального анализа основана на выполнении контроля тока и напряжения статора с последующим выполнением исследования полученного сигнала, что позволяет с высокой степенью достоверности определять состояние различных элементов электрической машины [2]. В основе данного метода лежит то, что любые возмущения в работе электрической или механической части двигателя (генератора) приводят к изменениям магнитного потока в зазоре электрической

машины и, следовательно, к слабой модуляции тока статора. Соответственно, существование в спектре тока и напряжения характерных (и несомпадающих) частот определенной величины свидетельствует о наличии поврежденных электрической или механической части устройства.

Исправность обмоток турбогенератора контролируют следующие защиты:

- 1) продольная дифференциальная защита генератора;
- 2) поперечная дифференциальная защита генератора;
- 3) 100 %-ая защита от замыканий на землю обмоток статора генератора с наложением 20 Гц;
- 4) 90 %-ая защита от замыканий на землю обмоток статора генератора по основной гармонике;
- 5) защита от замыканий на землю обмоток статора генератора по третьей гармонике;
- 6) защита ротора турбогенератора от замыканий на землю.

Все перечисленные защиты имеют пороговые значения (табл. 1). При превышении определенного параметра происходит срабатывание исполнительного органа, и далее поврежденный элемент отключается коммутационным аппаратом [3]. Устройства релейной защиты и автоматики предотвращают развитие аварии поврежденного элемента и исключают влияние аварийного режима на сеть. В настоящее время серьезной проблемой является отсутствие контроля плавного изменения параметров турбогенератора. Подобную информацию можно использовать для анализа состояния турбогенератора, а также для выявления аварийных процессов, происходящих в обмотках статора и ротора в процессе эксплуатации.

Для разработки новой методики диагностики турбогенератора в процессе эксплуатации подходит метод, который позволяет разложить токи и напряжения статора на гармонические составляющие [4]. Аварийную регистрацию электрических процессов осуществляют программно-технические комплексы с соответствующими функциями, в частности, специализированные цифровые осциллографы, либо устройства релейной защиты и автоматики с необходимыми характеристиками, которые позволяют реализовать функционал аварийной регистрации событий и/или непрерывной регистрации установившегося режима работы электрооборудования.

Для анализа аварийных ситуаций и контроля параметров турбогенератора на энергоблоках № 1 и № 2 НВ АЭС-2 разработана и внедрена система аварийных осциллографов на базе блоков регистрации и блоков выносных измерительных преобразователей производства фирмы «Парма» (г. Санкт-Петербург). Возможности данной системы позволяют измерять электрические параметры с частотой 19000 Гц в секунду, т.е. за один период

380 Герц, столь высокий уровень дискретизации позволяет раскладывать измеряемые величины на гармонические составляющие [5].

**Таблица 1.**  
**Пороговые значения защит**

**Table 1.**  
**Protection thresholds**

<b>Продольная дифференциальная защита генератора</b>	<b>Уставка</b>
Уставка по току $I_{\text{дифф}} >$	0,2 $I/I_n$ объекта
Выдержка времени ступени Пуск I-ДИФФ $>$	0,00 с
Уставка по току $I_{\text{дифф}} >>$	8,0 $I/I_n$ объекта
Выдержка времени ступени Пуск I-ДИФФ $>>$	0,00 с
<b>Поперечная дифференциальная защита генератора</b>	
Порог срабатывания $I_{z1}$	0,53 А
Выдержка на отключение	0,00 с
<b>100%-ная защита статора от замыканий на землю (20 Гц)</b>	
Величина Пуска сигнализации ступени $R <$	4992 Ом
Величина Пуска отключения ступени $R <<$	1992 Ом
Выдержка времени сигнализации ступени $R <$	10,00 с
Выдержка времени отключения ступени $R <<$	0,50 с
Величина Пуска $I >>$	0,83 А
<b>Защита статора от замыканий на землю (90 %)</b>	
Уставка $U_0 >$ (90 % защита от замыканий на землю)	16,0 В
Выдержка времени	0,50 с
<b>Защита от замыканий на землю обмоток статора генератора по третьей гармонике</b>	
Пуск ступени $U_0$ 3 гармоники $>$	1,0 В
Выдержка времени	0,50 с
<b>Защита ротора турбогенератора от замыканий на землю</b>	
Сопротивление срабатывания $R_{\text{ср}}$ 1-я ступень	3,5 кОм
Время срабатывания $t_{\text{ср}}$ 1-я ступень	6,0 с
Сопротивление срабатывания $R_{\text{ср}}$ 2-я ступень	2,5 кОм
Время срабатывания $t_{\text{ср}}$ 2-я ступень	0,5 с

Блок регистрации осуществляет:

- вычисление измеряемых величин в соответствии с техническими требованиями для всех функций;
- проверку условий запуска и запуск регистратора в функции «Регистратор» и «Устройство векторных измерений»;
- хранение и индикацию измерительной информации во всех функциях регистратора.

Блок выносных измерительных преобразователей предназначен:

- для преобразования токов и напряжений от стандартных измерительных трансформаторов тока, напряжения, измерительных шунтов к нормированному цифровому коду;
- для определения состояния дискретного сигнала;
- для математической обработки и преобразования информации в кодированный оптический сигнал.

Функциональная схема регистратора «Парма» имеет много общего с другими подобными системами.

### III. Анализ периодических функций

Анализ периодических функций (сигналов сложной формы) часто представляется в виде разбиения функции на отдельные составляющие (метод разложения Фурье) [6]. В электротехнике гармонический анализ остается основным способом анализа электрических цепей.

*Во-первых*, гармонические функции вида  $\sin(x)$ ,  $\cos(x)$ ,  $\sin(2x)$ ,  $\cos(2x)$ ,  $\sin(3x)$ ,  $\cos(3x)$  и т.д., образуют полную ортонормированную систему, т.е.:

$$\int_{-\pi}^{\pi} (\sin kx \cdot \cos mx) dx = \begin{cases} 1, & \text{при } (k = m) \\ 0, & \text{при } (k \neq m) \end{cases} \quad (1)$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots$  и  $m = 1, 2, 3, \dots$  – номера гармоник.

*Во-вторых*, если ряд Фурье сходится к некоей функции  $x(t)$ , то эта функция однозначно определяется дискретной совокупностью ряда. При ограниченном числе членов ряд Фурье обеспечивает наилучшее приближение к исходному сигналу в смысле среднеквадратичной погрешности. При увеличении числа членов ряда Фурье до бесконечности, среднеквадратичская погрешность будет стремиться к нулю. Однако из этого не следует, что ряд будет точно воспроизводить функцию  $x(t)$  в любой момент времени  $t$ .

*В-третьих*, гармонические сигналы обладают важным свойством сохранения своей формы при прохождении через линейные электрические цепи. Это крайне полезное свойство при анализе линейных электрических цепей, таких как частотные фильтры, фильтры симметричных составляющих и т.д. При анализе достаточно отследить изменение амплитуд и фаз отдельных гармоник, а затем – восстановить выходной сигнал путем суммирования выходных гармоник.

В тригонометрической форме ряд Фурье имеет следующий вид:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos k\omega_0 t + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin \omega_0 t, \quad (2)$$



где  $k = 1, 2, 3 \dots$  номер гармоники;  $\omega_0 = 2\pi/T_0$  – основная круговая частота;  $T_0$  – период.

Далее, через весовые коэффициенты при гармониках  $a_0, a_1, b_1 \dots a_k, b_k \dots$ , которые определяются по формулам:

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t) dt; \quad (3)$$

$$a_k = \frac{2}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t) \cos k\omega_0 t dt; \quad (4)$$

$$b_k = \frac{2}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t) \sin k\omega_0 t dt; \quad (5)$$

определяется уровень постоянной составляющей в сигнале:

$$A_0 = \frac{a_0}{2}. \quad (6)$$

Амплитуда любой гармоники и ее начальная фаза:

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad (7)$$

$$\text{tg}(\varphi_k) = \frac{a_k}{b_k}; \quad (8)$$

где  $\varphi_k$  – начальная фаза  $k$ -й гармоники.

Представим ряд Фурье в комплексной форме:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{jk\omega_0 t}, \quad (9)$$

где  $C_k = \frac{1}{T} \int_t^{t+T_0} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt$  – коэффициент при  $k$ -й гармонике являющийся комплексным числом  $k = 0, 1, 2, 3 \dots$  – номер члена ряда.

Из тождества Эйлера можно представить связь между комплексными и вещественными базовыми функциями:

$$e^{jk\omega_0 t} = \cos(k\omega_0 t) + j \sin(k\omega_0 t); \quad (10)$$

$$\cos k\omega_0 t = \frac{1}{2}(e^{jk\omega_0 t} + e^{-jk\omega_0 t}); \quad (11)$$

$$\sin k\omega_0 t = \frac{1}{2j}(e^{jk\omega_0 t} - e^{-jk\omega_0 t}). \quad (12)$$

Учитывая, что коэффициенты экспоненциального ряда являются комплексно-сопряженными числами, и используя показательную форму записи комплексного числа  $C_k = |C_k| e^{j\varphi_k}$ , выражение  $e^{jk\omega_0 t} = \cos(k\omega_0 t) + j \sin(k\omega_0 t)$  можно привести к виду:

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum_{-\infty}^{\infty} C_k e^{jk\omega_0 t} = \sum_{-\infty}^{\infty} |C_k| e^{j\varphi_k + jk\omega_0 t} = \\ &= \sum_0^{\infty} |C_k| \cdot [e^{j(\varphi_k + k\omega_0 t)}] = C_0 \sum_0^{\infty} 2|C_k| \cdot \cos(k\omega_0 t + \varphi_k). \end{aligned} \quad (13)$$

Из этого следует, что вещественная функция  $x(t)$  может быть представлена суммой косинусоид, имеющих амплитуды  $2|C_k|$  и начальные фазы  $\varphi_k$ . Следовательно, любая периодическая функция может быть представлена двумя способами: как в виде временной зависимости, так и совокупностью коэффициентов ряда Фурье, представляющих собой либо пары вещественных чисел, либо комплексные числа [8]. Физическая сущность коэффициентов ряда Фурье заключается в отражении амплитуд и начальных фаз отдельных гармонических составляющих, входящих в состав сложного периодического колебания.

Полный ряд Фурье содержит бесконечное число членов. Однако основная часть энергии реальных электрических колебаний передается в ограниченном диапазоне частот, т.е. конечным числом гармоник. Таким образом, в большей своей части коэффициенты полного ряда Фурье пренебрежимо малы на фоне конечного числа реально значимых коэффициентов. Это позволяет использовать при описании реальных колебаний конечные ряды Фурье.

Помимо вышеописанного, применяется метод анализа прямоугольных функций (функции Уолша, Адамари, Пэли и т.д.), однако все они обеспечивают хорошие результаты при анализе стационарных сигналов. При рассмотрении аperiodических сигналов, например, при возникновении нестационарных процессов, с преобразованием Фурье возникают проблемы, поскольку он не позволяет выявить частотно-временные возмущения сигнала [9]. Необходимость анализировать весь процесс в целом и одновременно видеть детальное представление о локальных особенностях сигнала

привело к появлению нового способа анализа – волновым преобразованиям (вейвлет-преобразованиям), которые все чаще применяются на практике.

#### IV. Результаты

На рис. 1 изображены гармонические составляющие тока статора в нормальном режиме работы турбогенератора. На втором блоке НВ АЭС-2 происходили резкие изменения напряжения ротора в пределах 120-180 В. Причина состояла в загрязнении щеточно-контактного аппарата (ЩКА). Происходило скачкообразное изменение напряжения ротора, следовательно, обрабатывала система возбуждения турбогенератора.

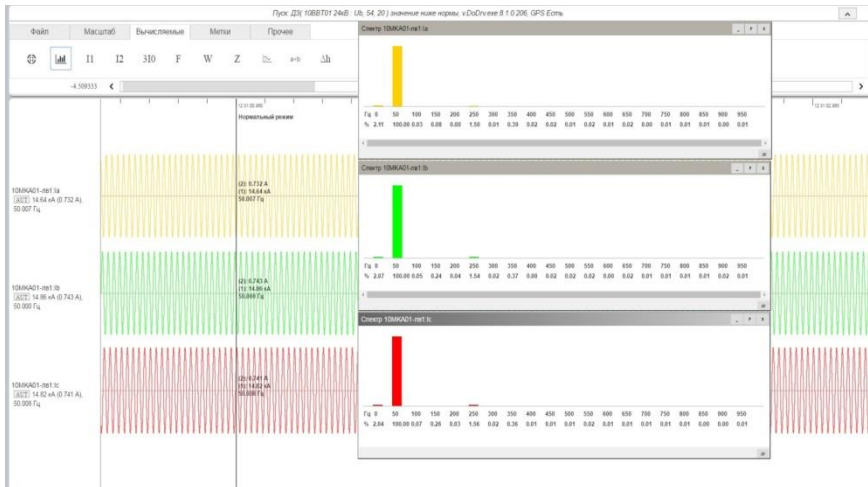
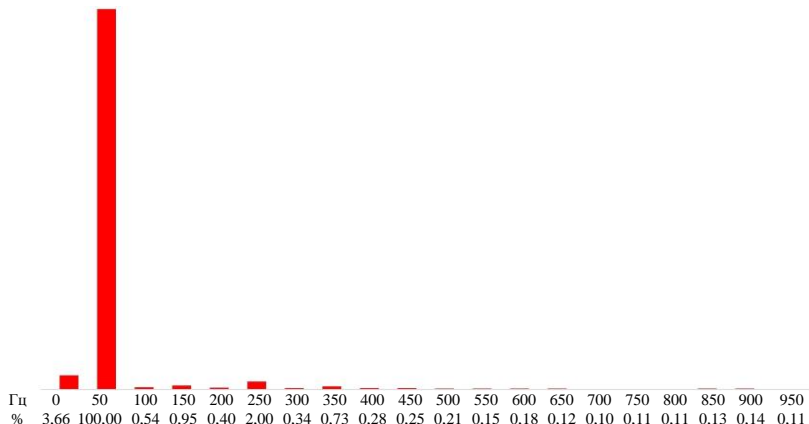


Рис. 1. Осциллограмма нормального режима работы турбогенератора

Fig. 1. Oscillogram of normal operation of turbo generator

Во время этого процесса происходили изменения амплитудных значений тока 5-й гармоники (250 Гц) на 10 % от штатного в большую сторону (рис. 2). Даже столь незначительный режим привел к изменению спектра тока статора, из этого следует, что при более значительных повреждениях возможно отследить развитие аварии путем непрерывной диагностики [10].



**Рис. 2. Гармоники тока в аварийном режиме работы. Фаза С**

**Fig. 2. Current harmonics in emergency mode. Phase C**

В настоящее время произведена настройка аппаратуры контроля аварийных событий, запрограммированная на регистрацию отклонений параметров при достижении отклонения 2 % тока одной из гармоник от номинального тока статора.

### **V. Заключение**

Исследования показали, что на современных АЭС не реализована в полной мере система непрерывной диагностики. Данный вопрос требует глубокого изучения и разработки новой методики непрерывного мониторинга состояния турбогенератора на основе контроля параметров, с помощью которой можно будет получать информацию о его состоянии в любой конкретный момент времени.

© Данилов А.Д., 2023

© Зимин А.И., 2023

© Ширяев Д.А., 2023

© Волков Д.М., 2023

*Поступила в редакцию 02.06.2023*

*Принята к публикации 20.06.2023*

*Received 02.06.2023*

*Accepted 20.06.2023*

**Библиографический список**

- [1] Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Физматгиз, 1962. – 236 с.
- [2] Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
- [3] Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи. М.: Высшая школа, 1990. – 400 с.
- [4] Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов. Ленинград.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 192 с.
- [5] Бронштейн И.Н. Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986. – 544 с.
- [6] Шмурьев В.Я. Анализ осциллограмм цифровых регистраторов во внешней среде // Энергетик. 2001. № 8. С. 33-35.
- [7] Шмурьев В.Я. Цифровая регистрация и анализ аварийных процессов в электроэнергетических системах. С.-Пб.: ПЭИПК, 2006.
- [8] «TRANSCOP». Универсальная программа просмотра, анализа и печати данных. Руководство пользователя. RU.31920409.00004. ООО «ПАРМА», Санкт-Петербург, 2017.
- [9] Программное обеспечение регистратора электрических процессов «ПАРМА РП 4.11». Руководство пользователя. RU.31920409.00007. ООО «ПАРМА», Санкт-Петербург, 2017.
- [10] Бобров В.В. Оценка эффективности основных методов диагностики асинхронных электродвигателей // Ползуновский вестник. 2012. № 3-1. С. 198-203.

**References**

- [1] A.A. Harkevich, *Spektry i analiz [Spectra and analysis]*. Moscow: Fizmatgiz, 1962 (in Russian).
- [2] I.S. Gonorovsky, *Radiotekhnicheskie cepi i signaly [Radio engineering circuits and signals]*. Moscow: Radio and communication, 1986 (in Russian).
- [3] P.N. Matkhanov, *Osnovy analiza elektricheskikh cepej. Linejnye cepi [Fundamentals of electrical circuit analysis. Linear chains]*. Moscow: Higher School, 1990 (in Russian).
- [4] V.S. Gutnikov, *Fil'traciya izmeritel'nyh signalov [Filtering of measuring signals]*. Leningrad: Energoatomizdat, Leningr. Department, 1990 (in Russian).
- [5] I.N. Bronstein and K.A. Semendyaev, *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchihsvya vtuzov [Handbook of mathematics for engineers and students of higher educational institutions]*. Moscow: Nauka, 1986 (in Russian).
- [6] V.Ya. Shmuryev, “Analiz oscillogramm cifrovyyh registratorov vo vneshnej srede [Analysis of oscillograms of digital recorders in the external environment]”, *Energetik*, no. 8, pp. 31-35, 2001 (in Russian).
- [7] V.Ya. Shmuryev, *Cifrovaya registraciya i analiz avarijnyh processov v elektroenergeticheskikh sistemah [Digital registration and analysis of emergency processes in electric power systems]*. St. Petersburg: PEIPC, 2006 (in Russian).
- [8] “TRANSCOP”. *Universal'naya programma prosmotra, analiza i pechati dannyh. Rukovodstvo pol'zovatelya [Universal program for viewing, analyzing and printing data. User guide]*. RU.31920409.00004. PARMA LLC, St. Petersburg, 2017.

- [9] *Programmnoe obespechenie registratora elektricheskikh processov "PARMA RP 4.11"*. *Rukovodstvo pol'zovatelya [Software for the recorder of electrical processes "PARMA RP 4.11". User guide]*. RU.31920409.00007. PARMA LLC, St. Petersburg, 2017.
- [10] V.V. Bobrov, "Оценка эффективности основных методов диагностики асинхронных электродвигателей [Evaluation of the effectiveness of the main methods for diagnosing asynchronous electric motors]", *Polzunovskiy Vestnik*, no. 3/1, pp. 198-203, 2012 (in Russian).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Данилов Александр Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Российская Федерация.

**Alexander D. Danilov**, D. Sci. (End.), professor of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

**Зимин Александр Игоревич**, начальник участка ЭЦ АО «Концерн Росэнергоатом», Филиал «Нововоронежская атомная станция», Нововоронеж, Российская Федерация.

**Alexander I. Zimin**, head of the department of the JSC "Rosenergoatom", Novovoronezh Nuclear Power Plant, Novovoronezh, Russian Federation.

**Ширяев Денис Александрович**, заместитель главного инженера по электротехническому оборудованию АО «Концерн Росэнергоатом», Филиал «Нововоронежская атомная станция», Нововоронеж, Российская Федерация.

**Denis A. Shiryaev**, deputy chief engineer for electrical equipment of the JSC "Rosenergoatom", Novovoronezh Nuclear Power Plant, Novovoronezh, Russian Federation.

**Волков Дмитрий Михайлович**, инженер по РЗА АО «Концерн Росэнергоатом», Филиал «Нововоронежская атомная станция», Нововоронеж, Российская Федерация.

**Dmitry M. Volkov**, engineer of the JSC "Rosenergoatom", Novovoronezh Nuclear Power Plant, Novovoronezh, Russian Federation.

УДК 621.355.9

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_31

## **РАЗРАБОТКА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРИЙНО ВЫПУСКАЕМЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ**

**Д.А. Алешин**ORCID: 0000-0003-0513-051X e-mail: [dmitriy.aleshin.nn@gmail.com](mailto:dmitriy.aleshin.nn@gmail.com)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижегород, Россия***А.В. Шалухо**ORCID: 0000-0002-8235-0658 e-mail: [shaluho@nntu.ru](mailto:shaluho@nntu.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижегород, Россия***М.К. Ешаев**ORCID: 0009-0000-9954-1947 e-mail: [maksat.eshaev@gmail.com](mailto:maksat.eshaev@gmail.com)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижегород, Россия***Н.М. Петухов**ORCID: 0000-0002-7682-4917 e-mail: [petunikolai@gmail.com](mailto:petunikolai@gmail.com)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижегород, Россия*

В настоящее время актуальной задачей является повторное использование аккумуляторных батарей. При этом сложность заключается в оценке остаточного ресурса элементов аккумуляторов. Статья посвящена разработке испытательного стенда для выполнения построения зарядно-разрядных характеристик серийно выпускаемых аккумуляторных батарей для последующей оценки их остаточного ресурса. Приведены структурная схема, основные параметры и функциональные возможности стенда. Особенностью является программное обеспечение собственной разработки, позволяющее автоматизировать процесс исследований. Представлены полученные с помощью стенда результаты исследований литий-железо-фосфатных аккумуляторных батарей. Развитие работы связано с разработкой методических рекомендаций по вторичному использованию аккумуляторных батарей различных типов.

**Ключевые слова:** аккумуляторные батареи, зарядно-разрядные характеристики, испытательный стенд, остаточный ресурс, повторное использование, состояние заряда.

**Для цитирования:** Алешин Д.А., Шалухо А.В., Ешаев М.К., Петухов Н.М. Разработка испытательного стенда и исследование характеристик серийно выпускаемых литиевых аккумуляторных батарей // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 4. С. 31-42. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_31

## **DEVELOPMENT OF A TEST BENCH AND CHARACTERISTICS RESEARCH OF SERIALLY PRODUCED BATTERIES**

**D.A. Aleshin**

ORCID: **0000-0003-0513-051X** e-mail: **dmitriy.aleshin.nn@gmail.com**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.V. Shalukho**

ORCID: **0000-0002-8235-0658** e-mail: **shaluho@nntu.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**M.K. Yeshaev**

ORCID: **0009-0000-9954-1947** e-mail: **maksat.eshaeв@gmail.com**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**N.M. Petukhov**

ORCID: **0000-0002-7682-4917** e-mail: **petunikolai@gmail.com**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Battery reuse is an urgent task in a nowadays power industry. The difficulty lies in estimating the remaining life of battery cells. The article is devoted to the development of a test bench for carrying out formation of the charge-discharge characteristics of commercially produced batteries to assess their residual life. The block diagram, main parameters and functionality of the stand are given. A special feature is proprietary software that allows you to automate the research process. The results of studies of lithium iron phosphate batteries obtained using the stand are presented. The future work is associated with the development of methodological recommendations for the recycling of various types of batteries.

**Keywords:** batteries, charge-discharge characteristics, test bench, residual life, reuse, state of charge.

**For citation:** D.A. Aleshin, A.V. Shalukho, M.K. Yeshaev and N.M. Petukhov, "Development of a test bench and characteristics research of serially produced batteries", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 31-42, 2023.

DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_31



## 1. Введение

В настоящее время в устройствах и системах с накопителями электрической энергии широко используются перезаряжаемые гальванические элементы (ГЭ) различных типов [1, 2], объединяемые в аккумуляторные батареи (АКБ). Среди ГЭ можно выделить литиевые элементы, которые характеризуются большой удельной мощностью и малыми токами утечки [3, 4], вследствие чего находят частое применение в электротранспорте и портативных устройствах.

Однако серьезной проблемой применения АКБ, в том числе, на основе литиевых ГЭ, является ограничение их ресурса, который в среднем составляет от 1 до 10 тыс. циклов *заряд/разряд* [5]. При этом циклируемость АКБ снижается при нарушении рекомендуемых условий эксплуатации (например, при потреблении от АКБ токов, превышающих номинальные значения, или эксплуатации при температурах, не соответствующих рабочему диапазону). Следствием истощения ресурса АКБ является уменьшение ее энергоемкости. Однако АКБ сохраняет функцию накопления и отдачи электрической энергии, что предоставляет возможность и делает актуальной задачу вторичного использования аккумуляторов [6-8].

Вторичное использование предполагает внедрение аккумулятора, истощившего свой ресурс в ходе эксплуатации, в устройство или систему, которые не требуют наличия значительной удельной энергии накопителя. Вторичное использование АКБ тесно связано с электротранспортной отраслью [9, 10]. Так, запас хода электромобиля снижается пропорционально остаточной емкости, используемой в нем АКБ. При замене отработанные АКБ могут быть вторично использованы, например, в стационарных системах накопления, для которых не критичны повышенные массогабаритные показатели. Также вторично используемые АКБ могут найти применение в устройствах для питания импульсных нагрузок и системах для сглаживания графика энергопотребления в течении суток [11].

Важной задачей при вводе в эксплуатацию вторично используемых аккумуляторов является их диагностика для корректировки электрической емкости и прогнозирования ее изменения при использовании [12]. На базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева разработан испытательный стенд, предназначенный для диагностики аккумуляторных батарей (как новых серийно выпускаемых, так и вторично используемых) и оценки их остаточного ресурса.

## II. Структура испытательного стенда

Структурная схема испытательного стенда для исследования параметров АКБ и его внешний вид представлены на рис. 1. Обозначения на рис. 1: ЗУ – зарядное устройство; Н – электронная нагрузка; К – контроллер для обработки измерений; ПК – персональный компьютер.

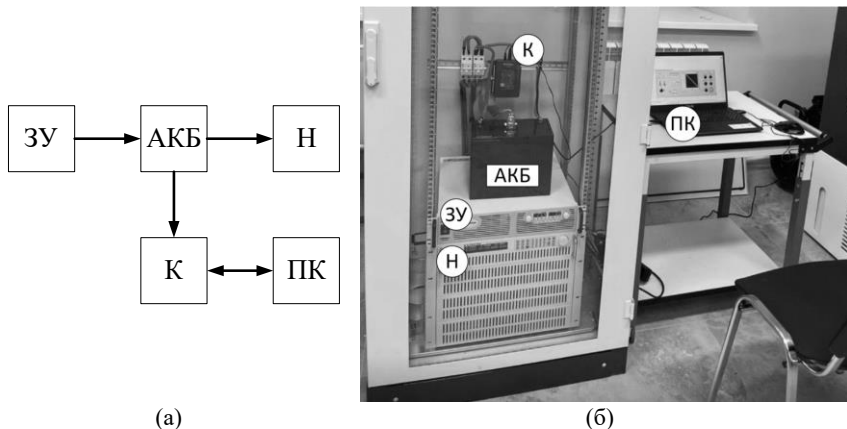


Рис. 1. Испытательный стенд для исследования параметров АКБ: структура (а); внешний вид (б)

Fig. 1. Test bench for determining the batteries parameters: structure (а); appearance (б)

В испытательном стенде в качестве зарядного устройства использован лабораторный источник питания. Контроллер предназначен для обработки измеренных значений напряжения и температуры ГЭ. Передача данных с контроллера оператору осуществляется с помощью персонального компьютера. Изменение режима исследований (с разряда на заряд и наоборот) выполняется коммутационными устройствами.

При разработке испытательного стенда были заданы предельные параметры исследуемых аккумуляторных батарей:

- 1) количество последовательно соединенных элементов в батарее – 6;
- 2) максимальное напряжение батареи – 20 В;
- 3) максимальный ток заряда – 20 А;
- 4) максимальный ток разряда – 30 А.

Для автоматизации процессов проведения исследований и обработки данных разработана специальная программа и дизайн панели оператора. Панель оператора состоит из двух окон и позволяет задать текущий режим работы, а также осуществить запуск программы, которая фиксирует состояние заряда, значения напряжения ГЭ и температуры АКБ.

Основное окно панели оператора предназначено для выбора основных параметров АКБ (номинальная емкость АКБ, режим задания зарядного/разрядного тока, режим работы батареи) и запуска процесс измерения параметров (рис. 2).

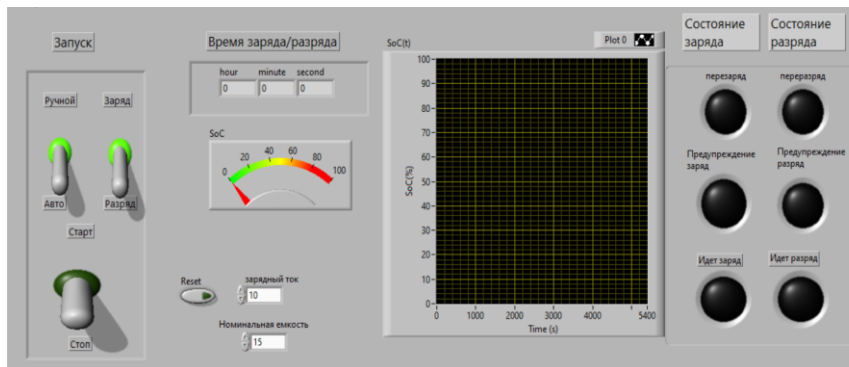


Рис. 2. Окно панели оператора испытательного стенда

Fig. 2. Test bench operator panel window

Значения токов заряда и разряда могут быть заданы автоматически или вручную. Ручной режим возможен только при использовании зарядного устройства и электронной нагрузки с функцией стабилизации генерируемого/потребляемого тока. На основании величины тока происходит расчет состояния заряда батареи с помощью закона Фарадея. Однако, для получения более точных данных в ходе эксплуатации батареи требуется ввод в работу либо полностью заряженной, либо полностью разряженной батареи. Также недостатком метода является невозможность оценить состояния заряда каждого элемента в составе АКБ.

Исходя из выбранного режима измерений (заряд или разряд АКБ), изменяется вид графика зависимости уровня заряда АКБ от времени ( $SoC(t)$ ).

В ходе работы АКБ индицируются следующие параметры:

- 1) текущее время работы АКБ;
- 2) текущий уровень состояния заряда ( $SoC$ ) АКБ;
- 3) наличие заряда/разряда АКБ;
- 4) наличие перезаряда/переразряда АКБ.

Индикация наличия перезаряда/переразряда основана на сравнении величины напряжения каждого аккумуляторного элемента с его минимальным/максимальным значением, которое задается индивидуально для каждого типа АКБ. При наличии перезаряда или переразряда оператор должен произвести отключение зарядного устройства или нагрузки.

Дополнительное окно панели оператора отображает: мгновенные значения напряжения элементов, среднее значение напряжения элементов и текущую температуру в двух точках АКБ (рис. 3).

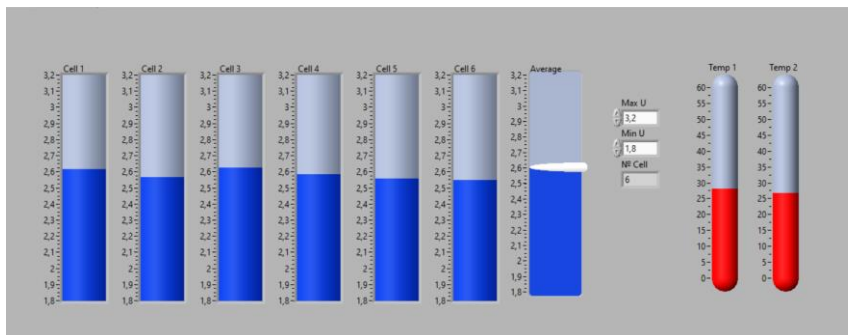


Рис. 3. Окно для индикации напряжения аккумуляторных элементов и температуры АКБ

Fig. 3. Window for indicating battery cell voltage and battery temperature

Поскольку максимальное количество входных каналов АЦП для контроллера равно 8, дополнительно были использованы переходные платы, содержащие АЦП с выходным цифровым интерфейсом и делителями напряжения, что позволило увеличить количество исследуемых элементов в составе АКБ.

Измерение напряжения на элементах АКБ выполняется по алгоритму, представленному на рис. 4. Его суть заключается в следующем. Вначале производится инициализация протокола приема-передачи данных и всех используемых переменных. Далее выполняется последовательных опрос каналов микросхем АЦП, полученные данные записываются в массив. Нулевые значения сформированного массива исключаются, и на следующем этапе рассчитываются значения напряжения каждого элемента батареи по формуле (1).

$$U_{cell}(n) = n * U_{ADC}(n) - (n-1) * U_{ADC}(n-1), \quad (1)$$

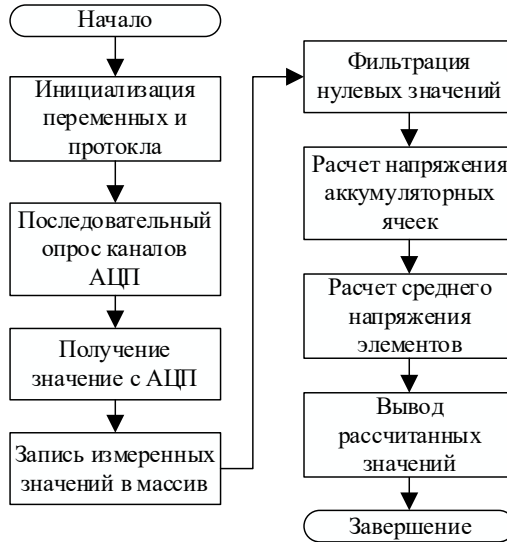
где  $n$  – порядковый номер элемента;  $U_{ADC}$  – величина измеренного напряжения;  $U_{cell}$  – напряжение аккумуляторного элемента.

Следующим пунктом рассчитывается среднее напряжение аккумуляторных элементов для определения перезаряженных и недозаряженных элементов. Все расчетные величины выводятся на панель оператора (рис. 3) и отображаются в виде графиков.

Для развития функциональных возможностей испытательного стенда предполагается внедрить:

1) автоматический запуск и автоматическое определения режима работы АКБ за счет измерения направления протекаемого тока;

2) определение состояния заряда аккумуляторных ячеек за счет сравнения напряжения элемента с данными о величине заряда АКБ, записанными в переходные таблицы (*Lookup Table*).



**Рис. 4. Блок-схема алгоритма измерения напряжения на аккумуляторных элементах**

**Fig. 4. Block diagram of the algorithm for measuring voltage on battery cells**

### III. Результаты исследований характеристик аккумуляторных батарей

С помощью разработанного испытательного стенда выполнены исследования характеристик серийно выпускаемых АКБ трех типов: никель-металлгидридных (*Ni-MH*), литий-железо-фосфатных (*LiFePO<sub>4</sub>*) и литий-титанатных (*LTO*). Паспортные данные исследуемых АКБ приведены в табл. 1.

В процессе исследований были построены зарядно-разрядные характеристики аккумуляторных элементов и получены данные об изменении их температуры в двух точках (в месте контактов и в середине аккумуляторной сборки).

Пример зарядной характеристики литий-железо-фосфатного аккумулятора (*LiFePO<sub>4</sub>*) приведен на рис. 5.

Таблица 1.  
 Параметры исследуемых аккумуляторных батарей

Table 1.  
 Parameter of research batteries

Типы АКБ	<i>Ni-MH</i>	<i>LiFePO4</i>	<i>LTO</i>
Номинальное напряжение, В	1,2	3,2	2,4
Емкость, Ач	10	15	15
Максимальный ток разряда, А	9,5	30	90
Максимальный ток заряда, А	2,85	15	75
Минимальное напряжение, В	1,0	2,0	1,5
Максимальное напряжение, В	1,4	3,6	2,8
Диапазон рабочих температур, °С	0 ~ +50	-30 ~ +60	-20 ~ +65
Циклируемость	1000	2000	4000

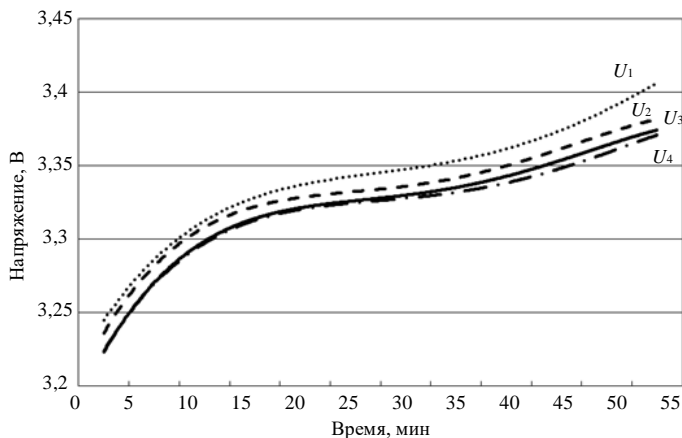


Рис. 5. Зарядная характеристика *LiFePO4* аккумуляторных элементов

Fig. 5. Charging characteristics of *LiFePO4* battery cells

Заряд АКБ производился током 15 А до уровня 90 %. Полученные данные соответствуют паспортной характеристике. В конце заряда разбаланс составил 40 мВ, что является приемлемой величиной для аккумуляторных накопителей общего назначения, но не для энергоемких систем, эксплуатируемых при максимально допустимых параметрах. В этом случае при увеличении напряжения потребуются дополнительные системы балансировки и контроля состояния батареи.

#### IV. Заключение

Одна из важных задач современной энергетики связана с возможностью вторичного использования аккумуляторных батарей. На базе НГТУ разработан испытательный стенд для определения параметров аккумуляторных батарей, позволяющий получить зарядно-разрядные характеристики для оценки остаточного ресурса.

Разрядно-зарядные характеристики серийно выпускаемых аккумуляторов, полученные посредством применения испытательного стенда при его отладке, соответствуют паспортным, что подтверждает правильность отладки элементов измерения.

Предполагается расширение функциональных возможностей испытательного стенда за счет добавления функции определения величины заряда аккумулятора на основании переходных таблиц, автоматического запуска и определения режима работы батареи.

*Работа выполнена в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (тема № FSWE-2022-0006).*

© Алешин Д.А., 2023

© Шалухо А.В., 2023

© Ешаев М.К., 2023

© Петухов Н.М., 2023

*Поступила в редакцию 15.11.2023*

*Принята к публикации 25.11.2023*

*Received 15.11.2023*

*Accepted 25.11.2023*

#### Библиографический список

- [1] Фисенко О.Б., Кубриков М.В. Обзор накопителей (аккумуляторов) энергии // Актуальные Проблемы Авиации и Космонавтики. 2013. Т. 1. № 9. С. 104-105.
- [2] Zyryanov V., Kiryanova N., Korotkov I., Nesterenko G., Prankevich G., Rudiuk I. Analysis of energy storage systems application in the Russian and world electric power industry // 2020 Ural Smart Energy Conference USEC 2020, Nov. 13-15, 2020, Ekaterinburg, Russia: IEEE, 2020. P. 106-109.  
DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281175
- [3] Фатыхов Р.Р., Хантимеров С.М., Сулейманов Н.М. Перспективы применения литий-ионных аккумуляторов в качестве резервных источников питания на электрических станциях // Вестник КГЭУ. 2017. № 4(36). С. 45-53.
- [4] Пехотиков В.А., Смелков Г.И., Рябиков А.И., Назаров А.А., Грузинова О.И. Состояние, перспективы и проблемы применения литий-ионных аккумуляторов // Сборник материалов Всерос. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы совер-

- шенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов», Апрель 20, 2021, Иваново, Россия: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2021. С. 251-255.
- [5] Chen C., Chen B., Wang T., Zheng J., Lin Z. Battery health assessment and life prediction in battery management system // 2022 3rd International Conference on Electronic Communication and Artificial Intelligence (IWEC AI), Jan. 14-16, 2022, Zhuhai, China: IEEE, 2022. P. 87-90. DOI: 10.1109/IWEC AI55315.2022.00025
- [6] Jie W., Hua L., Peijie C., Deyu Q., Shan L. Design of energy storage system using retired valve regulated lead acid (VRLA) batteries in substations // 2019 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), Oct. 16-17, 2019, Yogyakarta, Indonesia: IEEE, 2019. P. 132-136. DOI: 10.1109/CENCON47160.2019.8974821
- [7] Iliés A.I., Ciascai I., Pitica D. Methods for reusing Li-Ion cells from discarded battery packs // 2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), May 15-19, 2019, Wroclaw, Poland: IEEE, 2019. P. 1-6. DOI: 10.1109/ISSE.2019.8810304
- [8] Matsuda Y., Tanaka K. Reuse EV battery system for renewable energy introduction to island powergrid // 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe), Jun. 06-09, 2017, Milan, Italy: IEEE, 2017. P. 1-6. DOI: 10.1109/IEEEIC.2017.7977561
- [9] Muhammad M., Ahmeid M., Attidekou P.S., Milojevic Z., Lambert S., Das P. Assessment of spent EV batteries for second-life application // 2019 IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC), Nov. 25-28, 2019, Singapore, Singapore: IEEE, 2019. P. 1-5. DOI: 10.1109/IFEEEC47410.2019.9015015
- [10] Tong S., Fung T., Park J.W. Reusing electric vehicle battery for demand side management integrating dynamic pricing // 2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Nov. 02-05, 2015, Miami, FL, USA: IEEE, 2015. P. 325-330. DOI: 10.1109/SmartGridComm.2015.7436321
- [11] Keeli A., Sharma R.K. Optimal use of second life battery for peak load management and improving the life of the battery // 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, Mar. 04-08, 2012, Greenville, SC, USA: IEEE, 2012. P. 1-6. DOI: 10.1109/IEVC.2012.6183276
- [12] Sundaresan S., Sunil S., Balasingam B., Pattipati K.R. Fast offline battery capacity estimation approach with performance bounds // 2022 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Dec. 05-07, 2022, Victoria, BC, Canada: IEEE, 2022. P. 188-193. DOI: 10.1109/EPEC56903.2022.10000219

## References

- [1] O.B. Fisenko and M.V. Kubrikov, "Obzor nakopitelej (akkumulyatorov) energii [Overview of energy storage (accumulators)]", *Aktual'nye Problemy Aviacii i Kosmonavtiki [Current Problems of Aviation and Astronautics]*, vol. 1, no. 9, pp. 104-105, 2013 (in Russian).
- [2] V. Zyryanov, N. Kiryanova, I. Korotkov, G. Nesterenko, G. Prankevich and I. Rudiuk, "Analysis of energy storage systems application in the Russian and world electric



- power industry”, in proc. *2020 Ural Smart Energy Conference USEC 2020*, Nov. 13-15, 2020, Ekaterinburg, Russia, pp. 106-109.  
DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281175
- [3] R.R. Fatykhov, S.M. Khantimerov and N.M. Suleimanov, “Prospects for the use of lithium-ion batteries as standby power sources in electric power stations”, *Kazan State Power Engineering University Bulletin*, no. 4 (36), pp. 45-53, 2017.
- [4] V.A. Pehotikov, G.I. Smelkov, A.I. Ryabikov, A.A. Nazarov and O.I. Gruzina, “State, prospects and problems of application lithium - ion batteries”, in proc. *Aktual'nye Voprosy Sovershenstvovaniya Inzhenernyh Sistem Obespecheniya Pozharnoj Bezopasnosti Ob'Ektov [Current Issues in Improving Engineering Systems for Ensuring fire Safety of Facilities]*, Apr. 20, 2021, Ivanovo, Russia, pp. 251-255.
- [5] C. Chen, B. Chen, T. Wang, J. Zheng and Z. Lin, “Battery health assessment and life prediction in battery management system”, in proc. *2022 3rd International Conference on Electronic Communication and Artificial Intelligence (IWEC AI)*, Jan. 14-16, 2022, Zhuhai, China, pp. 87-90. DOI: 10.1109/IWEC AI5315.2022.00025
- [6] W. Jie, L. Hua, C. Peijie, Q. Deyu and L. Shan, “Design of energy storage system using retired valve regulated lead acid (VRLA) batteries in substations”, in proc. *2019 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, Oct. 16-17, 2019, Yogyakarta, Indonesia, pp. 132-136. DOI: 10.1109/CENCON47160.2019.8974821
- [7] A.I. Iliés, I. Ciascai and D. Pitica, “Methods for reusing Li-Ion cells from discarded battery packs”, in proc. *2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, May 15-19, 2019, Wroclaw, Poland, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ISSE.2019.8810304
- [8] Y. Matsuda and K. Tanaka, “Reuse EV battery system for renewable energy introduction to island powergrid”, in proc. *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Jun. 06-09, 2017, Milan, Italy, pp. 1-6. DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977561
- [9] M. Muhammad, M. Ahmeid, P.S. Attidekou, Z. Milojevic, S. Lambert and P. Das, “Assessment of spent EV batteries for second-life application”, in proc. *2019 IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEC)*, Nov. 25-28, 2019, Singapore, Singapore, pp. 1-5. DOI: 10.1109/IFEEC47410.2019.9015015
- [10] S. Tong, T. Fung and J.W. Park, “Reusing electric vehicle battery for demand side management integrating dynamic pricing”, in proc. *2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Nov. 02-05, 2015, Miami, FL, USA, pp. 325-330. DOI: 10.1109/SmartGridComm.2015.7436321
- [11] A. Keeli and R.K. Sharma, “Optimal use of second life battery for peak load management and improving the life of the battery”, in proc. *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*, Mar. 04-08, 2012, Greenville, SC, USA, pp. 1-6. DOI: 10.1109/IEVC.2012.6183276
- [12] S. Sundaresan, S. Sunil, B. Balasingam and K.R. Pattipati, “Fast offline battery capacity estimation approach with performance bounds”, in proc. *2022 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, Dec. 05-07, 2022, Victoria, BC, Canada, pp. 188-193. DOI: 10.1109/EPEC56903.2022.10000219

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ  
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Алешин Дмитрий Александрович**, старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Dmitry A. Aleshin**, senior lecturer of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

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

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

**Ешаев Максат Какаджанович**, инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Maksat K. Yeshaev**, engineer of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Петухов Николай Михайлович**, инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Nikolai M. Petukhov**, engineer of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

УДК 621.314.572:621.791.037

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_43

## УПРАВЛЕНИЕ СВАРОЧНЫМ ИНВЕРТОРОМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСВАРКИ ТРУБ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

**В.С. Савчук**

ORCID: 0000-0002-2281-6612 e-mail: [vladsava1997@mail.ru](mailto:vladsava1997@mail.ru)

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

**А.С. Плехов**

e-mail: [aplehov@mail.ru](mailto:aplehov@mail.ru)

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

Целью работы является разработка системы управления электродуговой сварочной установкой на основе анализа тепловых процессов и разработанных авторами алгоритмов управления режимами работы электрической силовой схемы источника питания. Используются математические и имитационные модели сварочных процессов с функциями управления импульсными режимами сварки. Рассмотрены электротермические факторы, влияющие на процесс формирования сварного шва. Предложен способ управления импульсами тока сварочной дуги.

**Ключевые слова:** зона термического влияния, источник питания, сварочный процесс, теплоперенос, электрическая дуга.

**Для цитирования:** Савчук В.С., Плехов А.С. Управление сварочным инвертором для электросварки труб высокого давления // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 4. С. 43-54. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_43

## WELDING INVERTER CONTROL FOR ELECTRIC WELDING OF HIGH-PRESSURE PIPES

**V.S. Savchuk**

ORCID: 0000-0002-2281-6612 e-mail: [vladsava1997@mail.ru](mailto:vladsava1997@mail.ru)

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.S. Plekhov**

e-mail: [aplehov@mail.ru](mailto:aplehov@mail.ru)

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The paper presents a development of control system for an electric arc welding installation based on the analysis of thermal processes and algorithms developed by the authors for controlling the operating modes of the power supply. Mathematical and simulation models of welding processes with control functions of pulsed welding modes are used. The electrothermal factors influencing the process of forming a weld are considered. A method for controlling the current pulses of the welding arc is proposed.

**Keywords:** electric arc, heat and mass transfer, power supply, zone of thermal influence, welding process.

**For citation:** V.S. Savchuk and A.S. Plekhov, “Welding inverter control for electric welding of high-pressure pipes”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 43-54, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_43

## I. Введение

Сварочное производство получило широкое распространение во многих отраслях промышленности, таких как машиностроение и станкостроение, а также в области строительства и изготовления технологического оборудования для энергетики, металлургии и химии.

Полуавтоматическая сварка *MIG*, *MAG*, *TIG* (сокращенно от *MIG* – *Metal Inert Gas*, дуговая сварка в защитной среде инертного газа; *MAG* – *Metal Active Gas*, дуговая сварка в защитной среде активного газа; *TIG* – *Tungsten Inert Gas*, сварка в среде инертного газа неплавящимся электродом), является основной технологией при производстве трубопроводов, эстакад и других опасных производственных объектов, тесно связанных со строительной отраслью нашей страны.

На рис. 1 представлены элементы оборудования для осуществления полуавтоматической дуговой сварки.

Исследователями отмечается много проблем в сварочной области, в том числе, разбрызгивание электродного материала в количестве, зависящем от видов и режимов самого процесса в зоне термического воздействия дуги. Еще одной проблемой является высокая инерционность электрических и температурных параметров дуги и элементов сварного шва [1, 2], которые оказывают прямое влияние на итоговое качество сварного изделия.

Качество сварного шва зависит от степени проплавления металла. Авторы предлагают концепцию управления тепломассопереносом расплавленных капель металла посредством изменения сварочного тока в функции электрического сопротивления между электродами, измеренного косвенным способом. Концепция построена на основе математической модели нагрева капли металла, переносимого с плавящегося электрода на сварной шов. Имитационные модели формируют температурные графики в зависи-

мости от толщины свариваемого металла. Результаты, полученные при имитационных экспериментах, проверяются на программируемой лабораторной установке «Лаборатор».

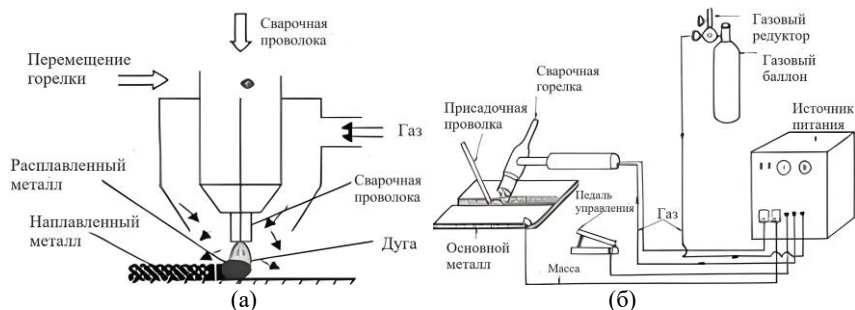


Рис. 1. Устройство горелки (а) и оборудование для реализации полуавтоматического сварочного процесса (б)

Fig. 1. Burner design (a) and equipment for implementing the semi-automatic welding process (b)

## II. Определение графика нагрева электродной капли

Силы [1], влияющие на формирование электродной капли при ее переносе в сварочную ванну шва, показаны на рис. 2, где  $F$  – электродинамическая сила, Н;  $P$  – сила тяжести, Н;  $G$  – сила внутреннего давления, Па;  $N$  – сила поверхностного натяжения. Здесь проявляется пинч-эффект – возникновение вокруг электрического проводника центростремительных сжимающих сил, пропорциональных квадрату тока в проводнике, он определяется эффектом Беннета [3]. Этот эффект присутствует в любой момент времени, когда ток не равен нулю. Но особое влияние на перенос металла в ванну этот эффект имеет именно на этапе формирования капли. После окончания начального периода короткого замыкания, когда резко увеличивается сварочный ток, начинается рост электромагнитных сил, которые сжимают перемычку, в результате чего образуется «мостик» между каплей и электродом. Значение тока зависит от типа и диаметра используемой сварочной проволоки. Далее сварочный ток повышается плавно, а не скачком, источник питания «готовится» к моменту отделения капли от электрода.

В процессе электродуговой сварки плавящимся электродом всегда имеет место переход электродного металла на изделие в виде капель, величина которых зависит от тока сварки. Поэтому при полуавтоматической сварке сопротивление дугового промежутка  $R_d$  зависит от фазы перехода капли в сварочную ванну и циклически изменяется во времени с частотой 20-200 Гц (рис. 3).

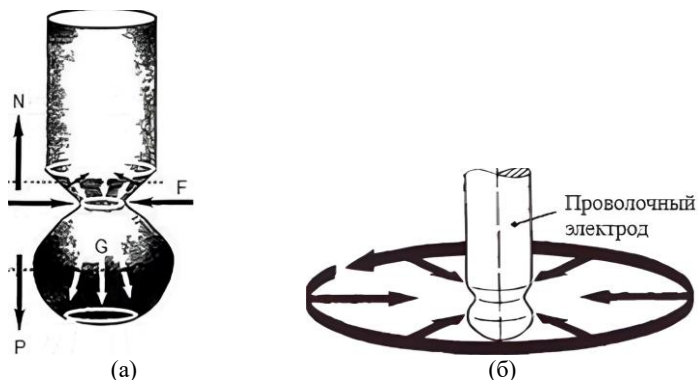


Рис. 2. Силы, влияющие на формирование электродной капли (а), и центростремительная сила (б)

Fig. 2. Forces influencing the formation of an electrode drop (a) and centripetal force (b)

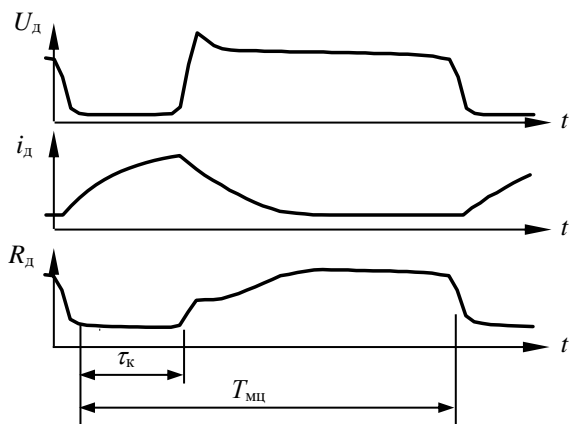


Рис. 3. Временные диаграммы:  
 $U_d$  – напряжение дуги, В;  $I_d$  – ток дуги, А;  $T_{\text{мц}}$  – время полного цикла, с;  
 $\tau_k$  – время короткого замыкания, с;  
 $R_d$  – сопротивление дугового промежутка, Ом

Fig. 3. Timing diagrams:  
 $U_d$  – arc voltage, В;  $I_d$  – arc current, А;  $T_{\text{мц}}$  – full cycle time, s;  
 $\tau_k$  – short circuit time, s;  $R_d$  – arc gap resistance, Ohm

Процесс сварки, который имеет наибольшие шансы на развитие, называется *STT*-процессом (сокращение от английского термина *Surface*

*Tension Transfer* – перенос за счет сил поверхностного натяжения), разработанный компанией «Lincoln Electric» (США) [4].

Сущность этого процесса заключается в том, что перенос массы расплавленного металла осуществляется путем не самопроизвольно сформированных импульсов, а путем принудительного создания коротких замыканий [5]. Формы кривых сварочного тока и напряжения при сварке методом *STT* изображены на рис. 4.

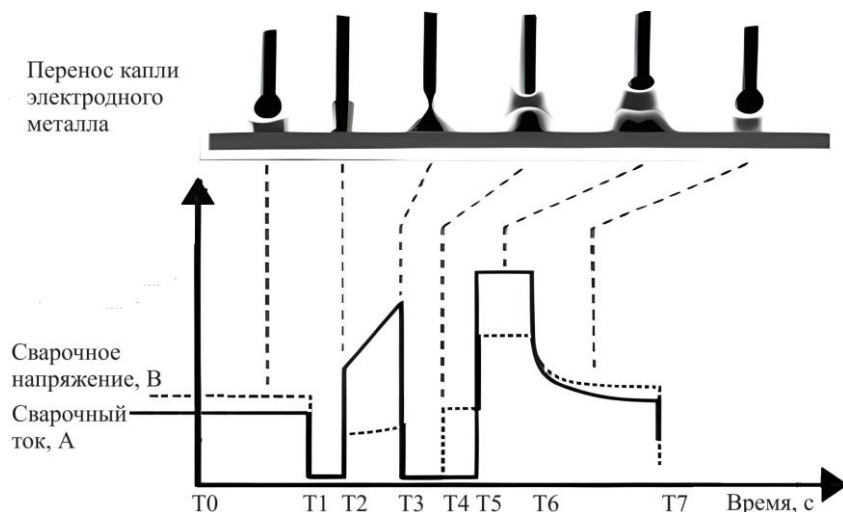


Рис. 4. Формы кривых сварочного тока и напряжения при сварке методом *STT*

Fig. 4. Shapes of welding current and voltage curves during *STT* welding

Капля металла переходит в ванну расплава в результате действия сил поверхностного натяжения. После касания каплей расплавленного металла сварочный ток резко уменьшается, и она начинает плавно «затягиваться» в ванну силами поверхностного натяжения, в результате этого разбрызгивание металла практически отсутствует. Ток дуги значительно зависит от фазы, в которой формируется капля на протяжении всего цикла переноса металла в сварочную ванну. Определение фазы переноса происходит за счет управления величины напряжения дуги.

Цикл, происходящий на рис. 4 можно разделить на следующие промежутки времени  $T_i$  и этапы  $i$ :

– подготовка капли в периоде времени  $T7-T0-T1$ ;

- начальный период короткого замыкания на  $T1-T2$ ;
- период возникновения сил на  $T2-T3$ ;
- рост капли на  $T5-T6$ ;
- переход на базовый ток на  $T6-T7$ .

Происходящие процессы с введением новых переменных математически описываются системой дифференциальных уравнений (2)-(7) и функциями (1). Уравнение (5) учитывает поддув защитного газа.

$$m_{\text{ану}} = (m_{\text{ан}}^*, t) \rightarrow \text{sym}U(t), I(t); \quad (1)$$

$$mc\theta = Q = Pt; \quad (2)$$

$$d / dt; mc\theta = Pt; \quad (3)$$

$$mc \frac{d\theta}{dt} = P \frac{dt}{dt}; \quad (4)$$

$$mc \frac{d\theta}{dt} = P - \gamma\theta; \quad (5)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{mc} P - \frac{\gamma}{mc} \theta; \quad (6)$$

$$P = P_{\text{д}} = U_{\text{д}} \cdot I_{\text{д}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T_{\text{плав}}} (U_{\text{д}}^2) dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T_{\text{плав}}} (I_{\text{д}}^2) dt} = U_{g_{\text{rms}}} \cdot I_{g_{\text{rms}}}, \quad (7)$$

где  $m$  – масса капли, кг;  $\theta$  – температура электродного металла, °С;  $Q$  – необходимое тепло для сварочного процесса, Дж;  $P$  – мощность источника, Вт;  $t$  – время сварочного цикла, с;  $\gamma$  – коэффициент теплоотдачи;  $T_{\text{плав}}$  – время плавления материала, с;  $U_{g_{\text{rms}}}$  – напряжение дуги с учетом ее переменного состояния, В;  $I_{g_{\text{rms}}}$  – ток дуги с учетом ее переменного состояния, А.

Вышеописанные уравнения упрощенно можно представить в виде:

$$\frac{U^2}{R} = P = UI = U \frac{U}{R} = RI = RI^2. \quad (8)$$

Имитационная модель, построенная в программной среде *MatLab Simulink*, при рассматриваемых выше тепловых процессах представлена на рис. 5. Блок *Constant* – заданная мощность, *Product1* и *Product2* – умножитель, необходимый для обрыва температурного нагрева после расплава, *Scope* – элемент, позволяющий снять осциллограмму, *Constant2* и *Constant1* элементы, задающие температуру расплава и ограничение нагрева в после-



дующем процессе, *Display* – отражает текущие значения состояния происходящего процесса, *Relay1* и *Relay2* элементы релейной электрической схемы управления электрической мощностью дуги.

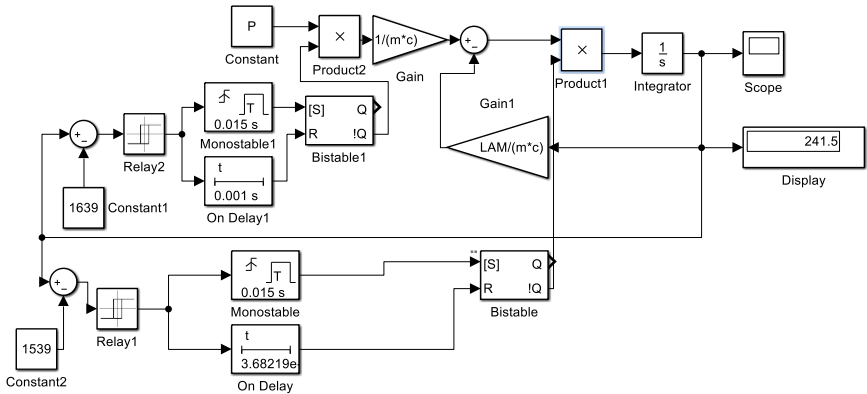


Рис. 5. Модель теплового процесса сварки

Fig. 5. Model of the thermal welding process

Наиболее точно сварочный процесс раскрывает (9):

$$Q = P_{\text{им}} \cdot T_{\text{им}} = m_{\text{кз}} c_{\text{кз}} \theta_{\text{кз}} + (m_{\text{зо}} + m_{\text{кз}}) \gamma + m_{\text{эд}} c_{\text{эд}} \theta_{\text{зо}} + \gamma_{\text{э}} (\theta_{\text{кз}} [\theta_{\text{с}}] + \gamma_{\text{д}} (\theta_{\text{зо}} - \theta_{\text{ср}})), \quad (9)$$

где  $Q$  – необходимое тепло для расплава капли, Дж;  $P_{\text{им}}$  – мощность импульса, Вт;  $T_{\text{им}}$  – время импульса, с;  $m_{\text{кз}}$  – масса капли, кг;  $c_{\text{кз}}$  – удельная теплоемкость металла;  $\theta_{\text{кз}}$  – температура плавления электродного металла, С;  $m_{\text{зо}}$  – масса активного пятна, кг;  $\gamma$  – удельная теплота плавления капли и активного пятна;  $m_{\text{эд}}$  – масса дуги, кг;  $c_{\text{эд}}$  – удельная теплоемкость дуги;  $\theta_{\text{зо}}$  – температура плавления активного пятна, С;  $\gamma_{\text{э}}$  – условная температура электрической дуги, С;  $\theta_{\text{с}}$  – среднее значение воздействия теплоты дуги, Дж;  $\gamma_{\text{д}}$  – удельная теплота активного пятна, Дж;  $\theta_{\text{ср}}$  – теплота рассеяния в окружающую среду, Дж.

Уравнение (9) позволяет осуществить расчет теплового баланса типового сварочного процесса, но с учетом указанных параметров процесса нагрева [6, 7].

График нагрева электродной капли металла, полученный с помощью модели на рис. 5, показан на рис. 6. Капля формируется непосредственно после пика на приведенном графике.

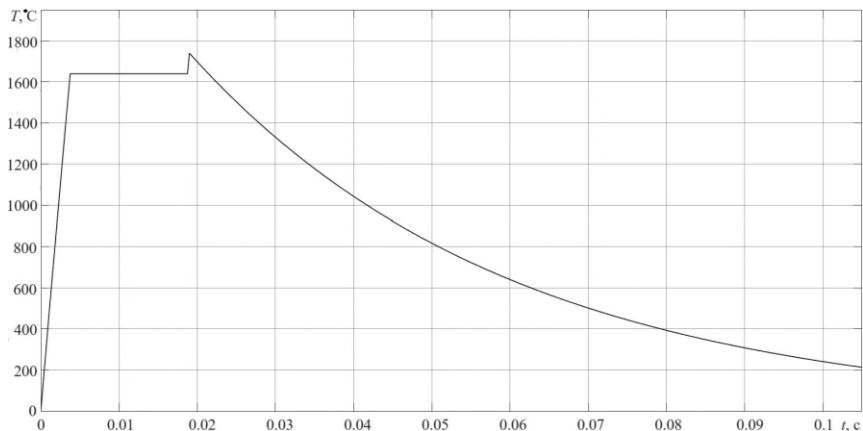


Рис. 6. График нагрева электродной капли

Fig. 6. Electrode drop heating shedule

### III. Управление сварочным током

Эффективным способом решения проблемы является изменение мощности импульсов тока и их частоты при изменении теплоты рассеяния в окружающую среду, зависящей, в свою очередь, от размеров свариваемого объекта [8].

Применяя стабилизатор напряжения на электродах  $U_{э}$ , можно своевременно корректировать процесс горения дуги [9]. Принимая за основу способ управления сваркой, при котором величину тока предварительного подогрева задают обратно пропорционально сопротивлению между электродами, косвенно измеренному в период действия предварительного импульса тока. Ток подогрева выключают, когда приращение сопротивления по абсолютной величине станет меньше заданного значения. Величину сварочного тока задают прямо пропорционально сопротивлению, измеренному в конце импульса тока подогрева, а его длительность – пропорционально квадрату величины этого сопротивления. В этом случае применяем способ с плавным нарастанием тока сварки, при котором измеряют сопротивление между электродами и по величине измеренного сопротивления управляют сварочным током. В процессе нарастания сварочного тока определяют экстремальную точку максимальной величины сопротивления, фиксируют ее, после чего продолжают сварку без изменения величины сварочного тока [10, 11].

Разработанная принципиальная схема управления сварочным инвертором приведена на рис. 7.

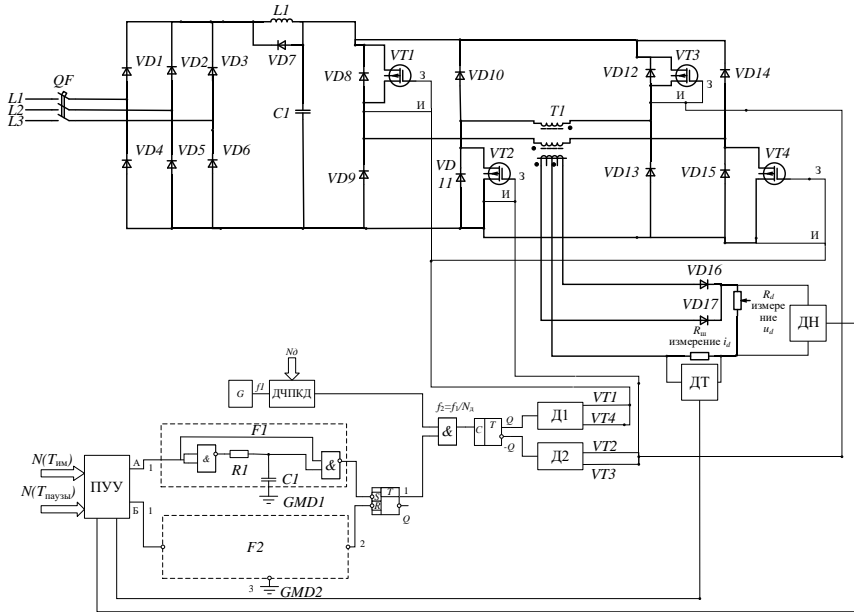


Рис. 7. Принципиальная электрическая схема сварочного инвертора

Fig. 7. Schematic diagram of the welding inverter

Принципиальная схема состоит из следующих компонентов:

- входной выпрямитель по схеме Ларионова;
- $L$ - $C$  фильтр;
- звено двойного несимметричного мостового инвертора;
- высокочастотный трансформатор;
- выпрямитель на выходе;
- сглаживающий фильтр;
- управляющий блок инвертора, который включает в себя программируемое устройство управления (ПУУ) с обратной связью по датчику напряжения (ДН) и датчику тока (ДТ); ДЧПКД – делитель частоты переменного коэффициента деления; Д1 и Д2 – драйвера для VT1, VT4 и VT2, VT3 соответственно; F1 и F2 – формователи.

Разработанная схема позволяет исключить «мертвое» время между импульсами тока в условиях непрерывного контроля параметров электрической дуги при импульсных режимах работы сварочного аппарата.

Результаты, полученные при имитационных экспериментах, проведены на программируемой лабораторной установке «Лаборатор».

На снимке (рис. 8) показан результат применения разработанной методики с использованием графика нагрева электродной капли и четко выверенными импульсами мощности.

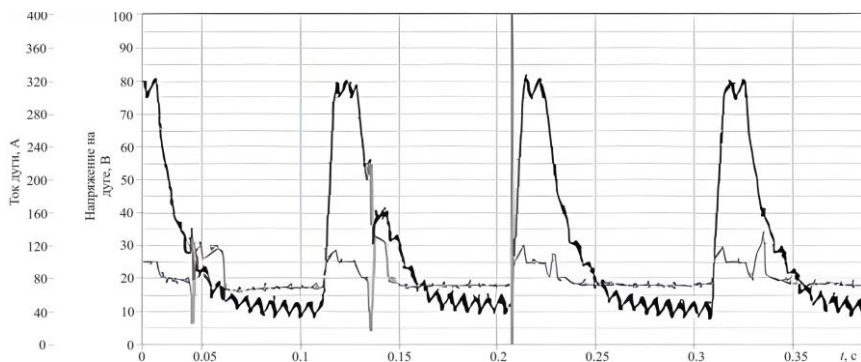


Рис. 8. Результат применения графика нагрева

Fig. 8. Result of applying the heating schedule

#### IV. Выводы

В работе рассмотрены зависимости влияния инертных параметров сварочного процесса на формирование сварочного шва, выведены математические и разработаны имитационные модели, позволяющие получить временные графики нагрева электродной капли. Показано, что предложенный способ управления инвертором позволяет добиться высокой степени проплавления шва. Разработанные схемы позволяют обеспечить процессы совмещения частотной модуляции тока дуги и переноса капли электродного металла, что позволяет увеличить производительность сварки. Показана возможность управления процессом сварки путем кратковременного шунтирования сварочной дуги, что позволяет формировать технологические характеристики процесса сварки.

© Савчук В.С., 2023

© Плехов А.С., 2023

Поступила в редакцию 24.05.2023

Принята к публикации 24.11.2023

Received 24.05.2023

Accepted 24.11.2023

**Библиографический список**

- [1] Завьялов В.Е., Иванова И.В., Кобецкой Н.Г. Технология сварки плавлением. С.-Пб.: Политехнический университет, 2018. – 484 с.
- [2] Мартынов Н.О. Электропитание установок дуговой сварки в системах электрооборудования // IN SITU. 2015. № 4. С. 42-44.
- [3] Решанов В.А. Практика разработки технологии сварки плавлением при изготовлении, монтаже, ремонте и реконструкции крупногабаритных стальных конструкций. С.-Пб.: Любавич, 2018. – 204 с.
- [4] Лебедев В.А. Механизованная и автоматическая синергетическая сварка с импульсной подачей электродной проволоки // Сварочное производство. 2014. № 2. С. 13-19.
- [5] Юхин Н.А. Механизованная дуговая сварка плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG). М.: Соуэло, 2008. – 72 с.
- [6] Карасев М.В., Вышемирский Е.М., Беспалов В.И., Работинский Д.Н., Захаров И.М., Беляев А.Е., Павленко Г.В., Соляник В.В. Особенности современных установок для механизированной сварки плавящимся электродом в защитных газах // Автоматическая сварка. 2004. № 12 (620). С. 38-41.
- [7] Кошелев П.А., Парамонов С.В. Электросварочные процессы и оборудование. С.-Пб.: ЛЭТИ, 2011. – 67 с.
- [8] Липпольд Д.С., Котеки Д.Д. Металлургия сварки и свариваемость нержавеющей сталей. С.-Пб.: Политехнический университет, 2011. – 467 с.
- [9] Козлов И.К., Сироткин Д.Г. Исследования и разработки в области анодной сварки // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 5(107). С. 426-431.
- [10] Володин В. Продвинутые источники сварочного тока // Силовая Электроника. 2014. № 4 (49). С. 82-90.
- [11] Савчук В.С. Автоматизированная система управления электродуговой сварочной установкой: вып. квалиф. работа магистра, НГТУ, Н. Новгород, 2021.

**References**

- [1] V.E. Zavyalov, I.V. Ivanova and N.G. Kobetskoy, *Tekhnologiya svarki plavleniem [Melting welding technology: textbook. Manual]*. St. Petersburg: Polytechnic University, 2018 (in Russian).
- [2] N.O. Martynov, “Elektropitanie ustanovok dugovoj svarki v sistemah elektrooborudovaniya [Power supply of arc welding installations in power supply systems]”, *IN SITU*, no. 4, pp. 42-44, 2015 (in Russian).
- [3] V.A. Rishanov, *Praktika razrabotki tekhnologii svarki plavleniem pri izgotovlenii, montazhe, remonte i rekonstrukcii krupnogabaritnyh stal'nyh konstrukcij [Practice of developing fusion-welding technology in the manufacture, installation, repair and reconstruction of large-sized steel structures]*. St. Petersburg: Lyubavich, 2018 (in Russian).
- [4] V.A. Lebedev, “Mechanized and automatic synergic welding with pulsed electrode wire feed”, *Welding International*, vol. 29, no. 2, pp. 140-144, March 2014. DOI: 10.1080/09507116.2014.897806

- [5] N.A. Yuhin, *Mekhanizirovannaya dugovaya svarka plavyashchimsya elektrodom v zashchitnyh gazah (MIG/MAG) [Mechanized arc welding with a melting electrode in protective gases (MIG/MAG)]*. Moscow: Souelo, 2008 (in Russian).
- [6] M.V. Karasev, E.M. Vyshemirsky, V.I. Bespalov, D.N. Rabotinsky, I.M. Zakharov, A.E. Belyaev, G.V. Pavlenko and V.V. Solyanik, "Peculiarities of modern machines for consumable electrode shielded-gas mechanized welding", *Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding)*, no. 12 (620), pp. 38-41, Dec. 2004.
- [7] P.A. Koshelev and S.V. Paramonov, *Elektrosvarochnyye processy i oborudovanie [Electric welding processes and equipment]*. St. Petersburg: LETI, 2011 (in Russian).
- [8] J.C. Lippold and D.J. Kotecki, *Metallurgiya svarki i svarivaemost' nerzhavayushchih stalej [Metallurgy of welding and weldability of stainless steel]*. St. Petersburg: Polytechnic University, 2011 (in Russian).
- [9] I.K. Kozlov and D.G. Syrotkin, "Studies and developments in the field of anodic welding", *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 5(107), pp. 426-431, 2014.
- [10] V. Volodin, "Prodvinutyie istochniki svarochnogo toka [Advanced sources of welding current]", *Power Electronics*, vol. 4, no. 49, pp. 82-90, 2014 (in Russian).
- [11] V.S. Savchuk, "Avtomatizirovannaya sistema upravleniya elektrodugovoj svarochnoj ustanovkoj [Automated control system of electric arc welding machine]", Master thesis, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia, 2021 (in Russian).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Савчук Владислав Сергеевич**, аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Vladislav S. Savchuk**, graduate student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Плехов Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Alexander S. Plekhov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

УДК 621.341.572:621.313.13-133.32

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_55

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВОЙНОЙ ИНВЕРТОРНОЙ СИСТЕМЫ В СОСТАВЕ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

**Т.Х. Абузьяров**

ORCID: 0000-0002-2527-7677 e-mail: atx888@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***А.Б. Дарьенков**

ORCID: 0000-0001-9941-4550 e-mail: darenkov@nntu.ru

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

Для биполярного управления шаговыми двигателями широко применяется мостовая схема соединения силовых элементов. К ее недостаткам можно отнести малый диапазон регулирования по скорости, высокий размах пульсаций фазного напряжения и, как следствие, высокую мощность динамических потерь в полупроводниковом преобразователе, а также высокий размах пульсаций генерируемого электроприводом момента. Применение двух мостовых инверторов, соединенных последовательно для каждой фазы шагового двигателя, позволяет снизить размах пульсаций напряжения на обмотках электродвигателя, потери в преобразовательной части привода, увеличить максимальную скорость вращения вала при меньшем напряжении источника питания. Целью работы является проверка работоспособности предложенной ранее схемы двойной инверторной системы в составе шагового электропривода, а также ее системы управления.

**Ключевые слова:** двойная инверторная система, автономный инвертор напряжения, дробление шага, мостовой преобразователь, шаговый электродвигатель, двоянный инвертор напряжения.

**Для цитирования:** Абузьяров Т.Х., Дарьенков А.Б. Экспериментальное исследование двойной инверторной системы в составе шагового электропривода // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 4. С. 55-64.  
DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_55

## DUAL INVERTER-FED STEPPER DRIVE EXPERIMENTAL RESEARCH

**T.Kh. Abuzyarov**

ORCID: **0000-0002-2527-7677** e-mail: **atx888@yandex.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.B. Dar'enkov**

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

**Abstract.** A bridge circuit for connecting power elements is widely used for bipolar control of stepper motors. The disadvantages of this scheme include a small range of speed control, a high phase voltage pulsations amplitude and, as a consequence, high power of dynamic losses in the semiconductor converter, as well as a high pulsation amplitude of the torque generated by the electric drive. The use of a dual inverter system makes it possible to reduce the converter output voltage pulsations amplitude, losses in power semiconductor elements, and increase the speed control range at a lower supply voltage. This paper presents a results of performance test of the previously proposed dual inverter system circuit as part of a stepper electric drive., as well as its control system.

**Keywords:** dual inverter, field-oriented control, H-bridge, stepper motor, voltage inverter, microstepping

**For citation:** T.Kh. Abuzyarov and A.B. Dar'enkov, "Dual inverter-fed stepper drive experimental research", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 55-64, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_55

### I. Введение

Простота изготовления, параметрирования и настройки, отсутствие необходимости в обслуживании, а также высокие показатели наработки на отказ позволяют применять электропривод на основе шаговых двигателей (ШД) в таких устройствах, как бытовая техника, станки с числовым программным управлением, мобильные сервисные роботы, космические аппараты и т.д. [1-2].

Широко распространенным схемным решением преобразовательной части для управления током фаз гибридных шаговых электродвигателей является применение мостового инвертора. Большие частоты переключения силовых элементов (из-за активного характера импеданса фазы), а также сравнительно высокая величина коммутируемого напряжения (равная



напряжению питания) являются причинами высоких значений динамических потерь в инверторе.

Вместе с тем, наблюдаемые закономерности в параметрах современных полевых транзисторов (класс напряжения, сопротивление открытого канала, быстродействие) указывают на целесообразность применения электроприводов с нестандартными схемными решениями силовой части преобразователя [3-11]. В [4-11] рассматривается каскадная схема преобразователя (в составе электропривода на основе электродвигателя с разомкнутыми обмотками), состоящего из двух мостовых инверторов, соединенных последовательно. Примечательно, что для работы систем такого типа достаточно, чтобы независимый источник питания в звене постоянного тока (ЗПТ) был только у одного из соединенных последовательно инверторов [9-11]. Инвертор без независимого источника напряжения при этом работает, компенсируя реактивную энергию электрической машины. Среди преимуществ таких каскадных преобразователей по сравнению с классической мостовой схемой отмечается увеличение диапазона регулирования скорости вращения ротора ШД, сниженные динамические потери силовых транзисторов, уменьшенный коэффициент гармонических искажений потребляемого тока.

Данное исследование является продолжением [11] и посвящено экспериментальной проверке работоспособности силовой части предложенного двойного инвертора и ряда предложенных блоков системы управления, а также проверке возможности функционирования данной системы при разомкнутом контуре положения.

## II. Структура электропривода и алгоритм работы

Преобразовательная часть исследуемого двойного преобразователя для питания двухфазного шагового электродвигателя представлена на рис. 1.

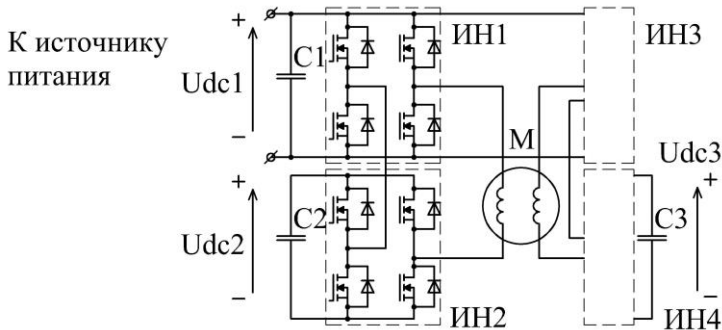


Рис. 1. Схема силовой части инвертора

Fig. 1. The dual inverter electric diagram

В [10, 11] для управления предложенным преобразователем предложено использовать принцип векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами. В экспериментальной установке применяется тот же принцип построения силовой части и некоторые из блоков системы управления, однако информация о положении вала ШД в системе отсутствует.

Для управления двойной инверторной системой предлагается использовать ПИ регулирование вектора тока статора во вращающейся системе координат  $dq$ . При этом угол поворота вращающейся системы координат не привязан к фактическому положению ротора ШД (информация о положении вала отсутствует в системе управления), вместо него используется соответствующий сигнал задания  $\theta_{r.ref}$ . Функциональная схема системы управления экспериментального образца представлена на рис. 2.

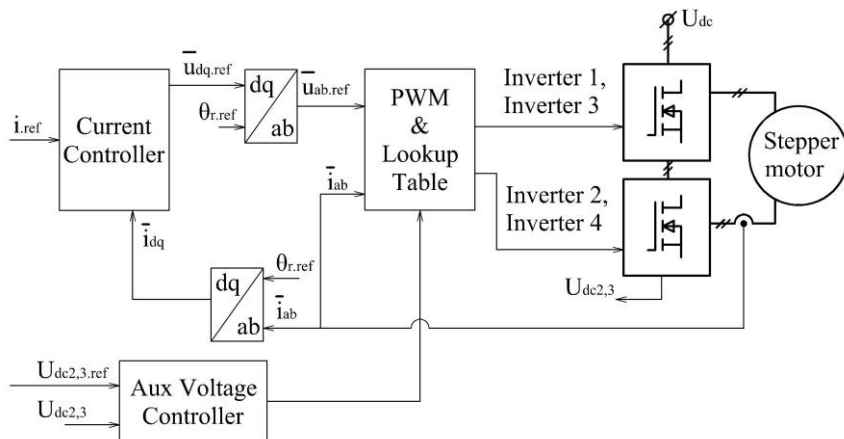


Рис. 2. Функциональная схема системы управления преобразователем

Fig. 2. The prototype dual inverter functional scheme

Применение преобразования Парка обеспечивает регулирование тока статора подобно тому, как это происходит при векторном управлении двигателем, позволяя (по сравнению с регулированием непосредственно наблюдаемых значений тока в фазах  $a$  и  $b$  ШД) избежать:

- снижения показателей качества регулирования фазного тока ШД при высоких скоростях вращения вала из-за значительно возрастающих возмущающих воздействий со стороны ЭДС, а также из-за возрастающей скорости изменения тока задания (при регулировании тока в осях  $ab$  ток задания постоянно изменяется по синусоидальному закону);
- необходимости перехода в полношаговый режим работы по достижении

некоторого порога скорости вращения вала для повышения максимального момента, генерируемого ШД.

Блок «Aux Voltage Controller» генерирует сигналы, используемые блоком «PWM and Lookup Table» для регулирования напряжения конденсаторов ЗПТ инверторов, ЗПТ которых не подключены к источнику питания.

Блок «PWM and Lookup Table» с помощью модулирующих сигналов задания напряжения и массива пилообразных несущих сигналов генерирует сигналы управления транзисторами двойного инвертора. В зависимости от текущего напряжения ЗПТ дополнительных инверторов, сигнала регулятора напряжения ЗПТ, и тока фазы с помощью таблицы поиска выбирается одна конфигурация состояний транзисторов двойной инверторной системы, реализующих необходимое выходное напряжение.

### III. Результаты исследования

Для проверки работоспособности фрагмента системы управления преобразователем разработана экспериментальная установка, включающая в себя:

- регулируемый источник питания 48 В;
- шаговый электродвигатель гибридного типа (параметры представлены в табл. 1);
- прототип двойного инвертора;
- систему управления на основе отладочной платы с микроконтроллером STM32f407ZGT6;
- 3д-печатный шкив, трос и грузы для создания момента нагрузки на валу ШД.

*Таблица 1.*

**Характеристики гибридного шагового электродвигателя**

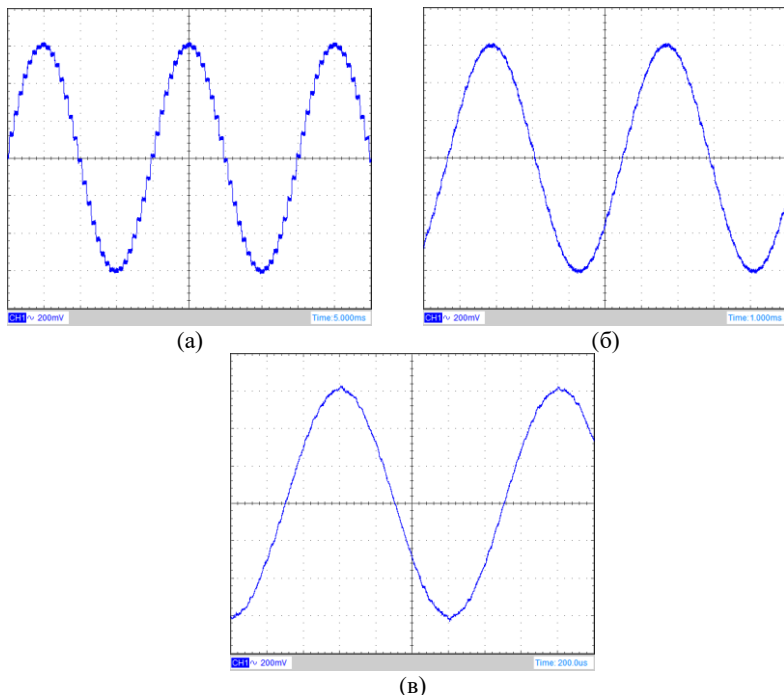
*Table 1.*

**Hybrid stepper motor specifications**

Характеристика	Значение
Число шагов на оборот	200
Число фаз	2
Номинальный момент, Н·м	0,89
Сопrotивление фазы, Ом	1,6
Номинальный ток фазы, А	2,3
Масса, кг	0,47

Для проверки работоспособности предложенного двойного инвертора и системы управления в составе шагового электропривода были получены осциллограммы фазного тока (рис. 3) и напряжения (рис. 4) ШД при различных скоростях вращения вала электродвигателя.

Ступенчатая форма тока статора ШД при скорости вращения вала 60 об/мин (рис. 3, а) обусловлена дискретным изменением сигнала задания положения  $\theta_{r.ref}$  системы управления, имитирующим интерфейс *STEP/DIR* коммерческих драйверов ШД в режиме дробления шага 1/8. Следует отметить, что при дальнейшем росте скорости выше 60 об/мин «ступенчатость» формы исчезает, однако форма тока остается синусоидальной. При этом амплитуда тока сохраняется благодаря организации контура тока во вращающейся системе координат  $dq$ .

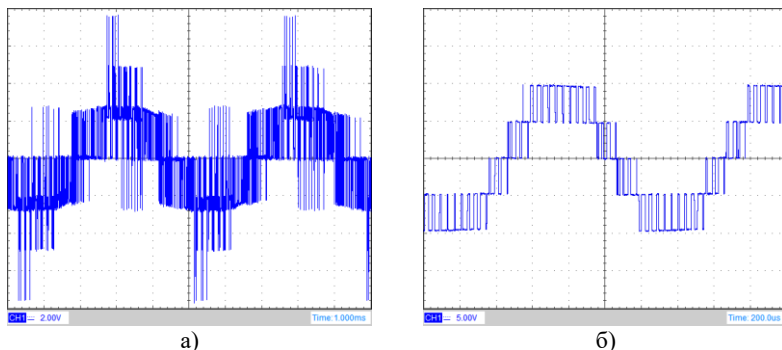


**Рис. 3. Осциллограммы фазного тока ШД (масштаб по вертикали 1,081 А/клетка) при скорости вращения вала ШД: 60 об/мин (а); 250 об/мин (б); 1000 об/мин (в)**

**Fig. 3. Stepper motor phase current oscillograms (scale 1.081 A per cell) with different rotor speed: 60 rpm (a); 250 rpm (б); 1000 rpm (в)**

Синусоидальная форма фазных токов при работе ШД на высоких скоростях вращения значительно снижает уровень шумов и вибраций, генерируемых электроприводом по сравнению с коммерческими моделями

драйверов ШД, применяющими разомкнутое регулирование контура положения. Следует отметить, что размах пульсаций выходного напряжения инвертора на низких скоростях вращения составляет всего  $\sim 26$  В. По мере разгона до 1000 об/мин этот показатель растет до 48 В, что связано с соответствующим регулированием напряжения конденсаторов дополнительных инверторов ИН2 и ИН4 (рис. 1). Размах пульсаций выходного напряжения драйвера ШД с применением классической мостовой схемы, обеспечивающим эквивалентный диапазон регулирования по скорости, составляет 72 В.



**Рис. 4. Осциллограммы фазного напряжения ШД при скорости вращения вала ШД: 250 об/мин (масштаб по вертикали 20 В/клетка) (а); 1000 об/мин (масштаб по вертикали 50 В/клетка) (б).**

**Fig. 4. Stepper motor phase voltage oscillograms with different rotor speed: 250 rpm (scale 20 V per cell) (a); b – 1000 rpm (scale 50 V per cell) (b).**

Всплески напряжения на низких скоростях вращения вала обусловлены неодновременностью переключения транзисторов основного и дополнительного инверторов в случаях, когда оба инвертора работают в режиме ШИМ. На более высоких скоростях необходимость в таких режимах работы встречается реже, так как емкости конденсаторов ЗПТ становится достаточно, чтобы поддерживать заданное значение напряжения на входе дополнительного инвертора на протяжении всего периода основной гармоники фазного тока ШД.

#### IV. Заключение

Экспериментальное исследование работы двойного инвертора в составе шагового электропривода указывает на работоспособность предложенной в предыдущих исследованиях силовой схемы при разомкнутом контуре регулирования положения. Напряжение звена постоянного тока дополнительных инверторов успешно регулируется в пределах от 50 до 100 % напряжения питания, что позволяет снизить размах пульсаций выходного

напряжения почти в три раза при низких скоростях вращения вала по сравнению с эквивалентной по диапазону регулирования по скорости классической мостовой схемой преобразовательной части.

Организация контура тока во вращающейся системе координат  $dq$  позволяет сохранять синусоидальную форму тока в широком диапазоне скоростей вращения вала электропривода, снижая пульсации генерируемого электроприводом момента, шум и вибрации, что потенциально уменьшает риск возникновения резонансных явлений.

© Абузяров Т.Х., 2023

© Дарьенков А.Б., 2023

*Поступила в редакцию 04.12.2023*

*Принята к публикации 11.12.2023*

*Received 04.12.2023*

*Accepted 11.12.2023*

### Библиографический список

- [1] Derammelaere S., Vervisch B., De Belie F., Vanwalleghem B., Cottyn J., Cox P., Van den Abeele G., Stockman K., Vandeveldel L. The efficiency of hybrid stepping motors: Analyzing the impact of control // IEEE Industry Applications Magazine. 2014. № 20 (4). P. 50-60. DOI: 10.1109/MIAS.2013.2288403
- [2] Le K.M., Hoang H.V., Jeon J.W. An advanced closed-loop control to improve the performance of hybrid stepper motor // IEEE Transactions on Power Electronics. 2016. № 32 (9). P. 7244-7255. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2623341
- [3] Абузяров Т.Х., Плехов А.С., Дарьенков А.Б., Ермолаев А.И. Разработка модели систем высококачественного бесколлекторного электропривода постоянного тока // Вестник ИГЭУ. 2020. №. 1. С. 31-45. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.1.031-045
- [4] Franquelo L.G., Rodriguez J., Leon J.I., Kouro S., Portillo R., Prats M.A.M. The age of multilevel converters arrives // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2008. № 2 (2). P. 28-39. DOI: 10.1109/MIE.2008.923519
- [5] Rodriguez J., Lai J.-S., Peng F.Z. Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications // IEEE Transactions Industrial Electronics. 2002. № 49 (4). P. 724-738. DOI: 10.1109/TIE.2002.801052
- [6] Loncarski J., Leijon M., Srdović M., Rossi C., Grandi G. Comparison of output current ripple in single and dual three-phase inverters for electric vehicle motor drives // Energies. 2015. Vol. 8. P. 3832-3848. DOI: 10.3390/en8053832
- [7] Абузяров Т.Х., Плехов А.С. Каскадный преобразователь для электротранспорта с пространственно-векторным управлением // Актуальные проблемы электроэнергетики, Декабрь 17-18, 2020, Нижний Новгород, Россия: НГТУ, 2020. С. 41-47. DOI: 10.46960/39255930\_2020\_41
- [8] Олещук В.И., Сизов А.С., Станкович А.М., Ярошенко Е.М. Электроприводы со сдвоенными инверторами и синхронизированным многоуровневым выходным напряжением // Проблемы региональной энергетики. 2006. № 1. [Электронный

- ресурсы]. URL: <https://journal.ie.asm.md/ru/contents/elektronnyij-zhurnal-n-1-2006> (дата обращения 07.08.2022).
- [9] Chowdhury S., Wheeler P., Gerada C., Lopez Arevalo S. A dual inverter for an open end winding induction motor drive without an isolation transformer // 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), March 2015, Charlotte, NC, USA: IEEE, 2015. P. 283-289. DOI: 10.1109/APEC.2015.7104364
- [10] Абузьяров, Т.Х. Двойная инверторная система для питания шагового электродвигателя с уменьшенным напряжением звена постоянного тока // Электротехнические Системы и Комплексы. 2021. № 1 (50). С. 27-34. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-27-34
- [11] Abuzyarov T., Plekhov A. Algorithm of field-oriented control of a dual inverter-fed stepper drive with use of the lookup table // 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Nov. 10-12, 2021, Lipetsk, Russia: IEEE, 2021. P. 1061-1065. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632025

### References

- [1] S. Derammelaere, B. Vervisch, F. De Belie, B. Vanwalleghem, J. Cottyn, P. Cox, G. Van den Abeele, K. Stockman, L. Vandeveldel, "The efficiency of hybrid stepping motors: Analyzing the impact of control", *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 20, no. 4, pp. 50-60, July-Aug. 2014. DOI: 10.1109/MIAS.2013.2288403
- [2] K.M. Le, H.V. Hoang and J.W. Jeon, "An advanced closed-loop control to improve the performance of hybrid stepper motor", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 9, pp. 7244-7255, Oct. 2016. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2623341
- [3] T.N. Abuzyarov, A.S. Plehov, A.B. Darenkov and A.I. Ermolayev, "Development of a high-quality brushless DC electric drive systems model", *Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University*, no. 1, p. 31-45, 2020. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.1.031-045
- [4] L.G. Franquelo, J. Rodriguez, J.I. Leon, S. Kouro, R. Portillo and M.A.M. Prats, "The age of multilevel converters arrives", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 28-39, Jun. 2008. DOI: 10.1109/MIE.2008.923519
- [5] J. Rodriguez, J.-S. Lai and F.Z. Peng, "Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, Aug. 2002. DOI: 10.1109/TIE.2002.801052
- [6] J. Loncarski, M. Leijon, M. Srdović, C. Rossi and G. Grandi, "Comparison of output current ripple in single and dual three-phase inverters for electric vehicle motor drives", *Energies*, vol. 8, pp. 3832-3848, May 2015. DOI: 10.3390/en8053832
- [7] T.H. Abuzyarov and A.S. Plehov, "Kaskadnyj preobrazovatel' dlya elektrotransporta s prostanstvennovektornym upravleniem [Space vector control dual-inverter for an electric vehicle]", in proc. *Aktualnyye problemy elektroenergetiki [Actual problems of the electric power industry]*, Dec. 17-18, 2020, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 41-47 (in Russian). DOI: 10.46960/39255930\_2020\_41

- [8] V. Oleschuk, A. Sizov, A. Stankovic and E. Yaroshenko, "Dual inverter-fed drives with the synchronised multilevel voltage waveforms", *Problemy regionalnoy energetiki*, no. 1, 2006. [Abstract]. Available at: Problemy regionalnoy energetiki, <https://journal.ie.asm.md/ru/contents/elektronnyj-zhurnal-n-1-2006>.
- [9] S. Chowdhury, P. Wheeler, C. Gerada and S. Lopez Arevalo, "A dual inverter for an open end winding induction motor drive without an isolation transformer", in proc. *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Mar. 15-19, 2015, Charlotte, NC, USA, pp. 283-289. DOI: 10.1109/APEC.2015.7104364
- [10] T.H. Abuzyarov, "Dual inverter system for powering the stepper motor with reduced DC link voltage", *Electrical Systems and Complexes*, vol. 1, no. 50, pp. 27-34, 2021. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-27-34
- [11] T. Abuzyarov and A. Plekhov, "Algorithm of field-oriented control of a dual inverter-fed stepper drive with use of the lookup table", in proc. *2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, Nov. 10-12, 2021, Lipetsk, Russia, pp. 1061-1065. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632025

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Абузыров Тагир Хусаннович**, аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Tagir Kh. Abuzyarov**, postgraduate student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Дарьенков Андрей Борисович**, доктор технических наук, заведующий кафедрой, директор Образовательно-научного института электроэнергетики Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Andrey B. Dar'enkov**, D. Sci. (Eng.), head of the chair, director of the Institute of Electric Power Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.



УДК 621.3.076.7

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_65

## АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ДЛЯ КОНТРОЛЛЕРА ДВИЖЕНИЯ

**В.М. Иванов**

ORCID: 0000-0002-0332-5738 e-mail: v.ivanov@ulstu.ru

Ульяновский государственный технический университет

*Ульяновск, Россия*

Одно из актуальных направлений развития средств числового программного управления связано с разработкой распределенных систем управления. В статье рассматривается алгоритмическое обеспечение контроллера для реализации задач траекторного управления шаговым электроприводом. В качестве базового алгоритма принят интерполяционный алгоритм, реализованный по методу оценочной функции. При этом предполагается, что основное взаимодействие центральной ЭВМ и контроллера движения осуществляется путем загрузки массива точек траектории. Особенности алгоритма связаны с отслеживанием координат в процессе отработки кадров. В отличие от известных аналогов, в рассматриваемых алгоритмах нет явного выделения ведущей координаты. Это обеспечивается за счет равноценных ветвей решений и анализа приращений координат. Рассмотренные принципы отработки траектории позволяют работать как в правосторонней, так и в полной системе декартовых координат.

**Ключевые слова:** бесколлекторный двигатель постоянного тока, интерполяция, контроллер движения, метод оценочной функции, шаговый двигатель.

**Для цитирования:** Иванов В.М. Алгоритмы управления шаговым электроприводом для контроллера движения // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 4. С. 65-77. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_65

## STEPPER MOTOR CONTROL ALGORITHMS FOR MOTION CONTROLLER

**V.M. Ivanov**

ORCID: 0000-0002-0332-5738 e-mail: v.ivanov@ulstu.ru

Ulyanovsk State Technical University

*Ulyanovsk, Russia*

**Abstract.** One of the actual directions of the development of numerical control software is associated with the development of distributed control systems. The article considers the algorithmic support of the controller for the implementation of the tasks of

trajectory control of a stepper electric drive. The interpolation algorithm implemented by the method of the evaluation function is adopted as the basic algorithm. It is assumed that the main interaction of the central computer and the motion controller is carried out by loading an array of trajectory points. The algorithm features are related to tracking coordinates during frame processing. Unlike the known algorithms, there is no explicit allocation of the leading coordinate in the algorithms under consideration. This is ensured by equivalent branches of solutions and analysis of coordinate increments. The considered principles of working out the trajectory allow you to work both in the right-hand and in the full Cartesian coordinate system.

**Keywords:** brushless DC electric motor, evaluation function method, interpolation, motion controller, stepper motor.

**For citation:** V.M. Ivanov, “Stepper motor control algorithms for motion controller”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 65-77, 2023.  
DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_65

## I. Введение

В настоящее время основу современных средств числового программного управления составляют промышленные компьютеры и контроллеры. Для расширения функциональных возможностей промышленных компьютеров ряд фирм в состав комплектующих блоков вводит интеллектуальные модули, за счет которых решаются задачи интерполяции и управления сервоприводами и шаговыми электроприводами. Преимущества распределенных систем числового программного управления, прежде всего, связаны с решением проблем реального времени, которые возникают при многокоординатной обработке. Наличие развитого интерфейса существенно расширяет возможности при обработке входной информации и формировании сигналов управления. Для решения данных задач используются микроконтроллеры (МК) общепромышленных серий, имеющих по сравнению с центральным процессором сравнительно низкое быстродействие. Можно отметить, что основная стоимость контроллеров движения определяется затратами на разработку алгоритмического и программного обеспечения.

Отсутствие или недостаточная проработанность алгоритмов является сдерживающим фактором при разработке, так как на системном уровне с помощью них определяется взаимодействие специалистов различного профиля.

Целью данной работы является разработка унифицированных алгоритмов, учитывающих общность систем команд микроконтроллеров, при реализации задач траекторного управления шаговым электроприводом.

## II. Линейная интерполяция по методу оценочной функции

Основными типами интерполяции, используемыми в станочных системах числового программного управления (ЧПУ), является линейная и круговая интерполяция [1, 2]. К числу наиболее простых и распространенных относится интерполяционный алгоритм, реализованный по методу оценочной функции [3, 4]. Методология данного алгоритма предполагает формирование элементарных приращений, что определяет использование, в качестве основного исполнительного, шагового двигателя (ШД).

Данный метод первоначально использовался при аппаратной реализации алгоритмов. В [5, 6] произведено обоснование метода и рассмотрены варианты реализации для формирования произвольных функций. Однако вопросы детализации алгоритмов для контроллеров движения рассмотрены недостаточно полно.

Интерполяция по данному алгоритму обычно ведется в абстрактных координатах  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , в отличие от реальных координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . При этом интерполяционные расчеты ведутся в первом квадранте соответствующей плоскости, а преобразование координат производится на этапе интерпретации кадра.

Рассмотрим линейную интерполяцию по двум координатам (рис. 1), где показана ступенчатая отработка движения в функции  $F$ , учитывающей знак отклонения траектории от заданной прямой.

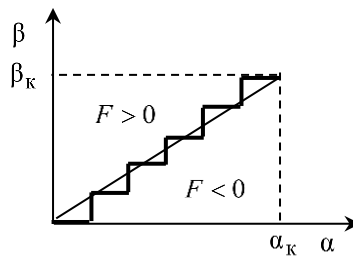


Рис. 1. Линейная интерполяция по методу оценочной функции

Fig. 1. Linear interpolation by the evaluation function method

Примем в качестве основного варианта определения координат ввод их значений относительно нулевой точки. Тогда расчетное уравнение прямой для участка траектории может быть записано следующим образом:

$$\beta = \frac{Y_i - Y_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \alpha = \frac{\Delta Y_i}{\Delta X_i} \alpha = \frac{\beta_k}{\alpha_k} \alpha, \quad (1)$$

где  $(X_{i-1}, Y_{i-1})$  и  $(X_i, Y_i)$  – начальная и конечная точки участка траектории;  $\Delta X_i, \Delta Y_i$  – приращения координат;  $i = 1, 2, 3 \dots n$  – номер участка;  $\alpha_k, \beta_k$  – конечные значения координат на участке траектории.

Приращения координат определяют участок обработки и в общем случае могут иметь произвольные значения. Для привязки интерполяционных расчетов к первому квадранту необходимо формировать модули  $|\Delta X_i|, |\Delta Y_i|$  приращений. При этом, чтобы отслеживать значения координат  $\alpha, \beta$  на плоскости, необходимо учитывать знаки  $\text{sgn}\Delta X, \text{sgn}\Delta Y$  приращений координат. Эти признаки также используются и для определения направления движения исполнительных приводов по соответствующей координате. Очевидным условием, связанным с отработкой движения и формированием признака его окончания, является также выбор ведущей координаты, которая определяется по наибольшему приращению в кадре.

В качестве оценочной функции в любой точке  $i$  траектории можно принять разность текущего и расчетного значений координаты

$$F_i(\alpha_i, \beta_i) = \beta_i - \frac{\beta_k}{\alpha_k} \alpha_i, \quad (2)$$

Учитывая, что при формировании закона управления движением имеет значение только знак оценочной функции, последнее выражение может быть представлено в виде:

$$F_i(\alpha_i, \beta_i) = \alpha_k \beta_i - \beta_k \alpha_i, \quad (3)$$

После выполнения шага по координате  $\alpha$ , следующее значение оценочной функции будет:

$$F_{i+1}(\alpha_i + 1, \beta_i) = \alpha_k \beta_i - \beta_k (\alpha_i + 1) = F_i(\alpha_i, \beta_i) - \beta_k, \quad (4)$$

Если выполняется шаг по координате  $\beta$ , то оценочная функция:

$$F_{i+1}(\alpha_i, \beta_i + 1) = \alpha_k (\beta_i + 1) - \beta_k \alpha_i = F_i(\alpha_i, \beta_i) + \alpha_k. \quad (5)$$

Управление движением по (4), (5) происходит по следующим правилам. Если в данный момент времени значение оценочной функции положительно  $F(\alpha, \beta) > 0$ , то делается шаг по координате  $\alpha$ , если отрицательно  $F(\alpha,$

$\beta) < 0$ , то выполняется шаг по координате  $\beta$ . Без ограничения общности рассмотренные положения для ведущей координаты  $\alpha$  могут быть использованы для ведущей координаты  $\beta$ .

### III. Алгоритмы управления

Обработка участка траектории должна осуществляться с заданной скоростью подачи  $v_3$ . Кроме того, необходимо обеспечить разгон и торможение с допустимым темпом изменения скорости. На диаграмме движения (рис. 2) можно выделить три основных участка: разгона ( $0 - \alpha_p$ ), движения с постоянной скоростью ( $\alpha_p - \alpha_t$ ), торможения ( $\alpha_p - \alpha_k$ ). Изменение скорости на участках разгона и торможения может иметь кусочно-линейный характер, учитывающий выборку люфтов в кинематических передачах, влияние сухого трения и уменьшение скорости для точного позиционирования [7].

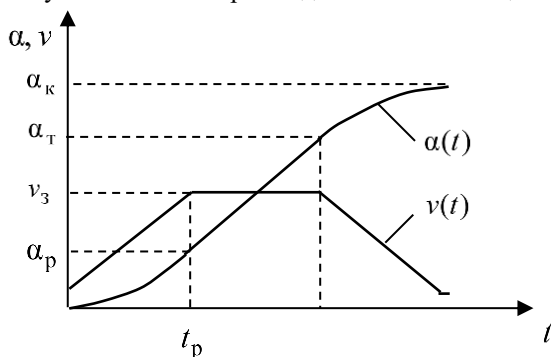


Рис. 2. Диаграмма линейного разгона и торможения

Fig. 2. Diagram of linear acceleration and deceleration

Специфические особенности метода оценочной функции связаны с тем, что скорость перемещения определяется частотой  $f$  выдачи элементарных приращений:

$$v = \frac{h}{T} = h \cdot f, \quad (6)$$

где  $h$  – цена единичного шага перемещения (дискретность);  $T$  – период прерываний от таймера.

С учетом рабочих и ускоренных перемещений, диапазон скоростей приводов подач значителен. Это определяют повышенные требования к диапазону изменения частоты прерываний от таймера. Примем в качестве основного закон, обеспечивающий равноускоренный пуск. Пусть начальная

частота равна  $f_0$ , тогда, задав допустимое приращение частоты (приемистость) на интервале  $T_0 = 1/f_0$ , получим:

$$f_1 = f_0 + \nabla f_0 = f_0 + kT_0, \quad (7)$$

где  $k = \frac{\nabla f_0}{T_0}$ .

Аналогично можно получить следующую частоту, используя итерационную формулу:

$$f_n = f_{n-1} + kT_{n-1}, \quad (8)$$

и определить коэффициент деления эталонной частоты  $f_{\text{эт}}$  таймера

$$N_n = \text{Ent} \frac{f_{\text{эт}}}{f_n}, \quad (9)$$

где  $\text{Ent}$  – целочисленное значение.

Рассчитанные значения коэффициентов деления записываются в виде таблицы. Выход на заданное значение скорости в этом случае определяется по пройденному пути, соответствующему количеству отработанных шагов. Конечное значение  $N_k$  указателя, по которому осуществляется выборка из таблицы коэффициентов и загрузка в таймер, определяется следующим образом: если  $X > 2 \cdot k$ , то  $N_k = k$ , иначе  $N_k = X / 2$ . Здесь  $k$  – число элементов таблицы. К недостаткам рассмотренного варианта формирования скорости можно отнести: необходимость пересчета табличных значений для изменения темпа приращения скорости.

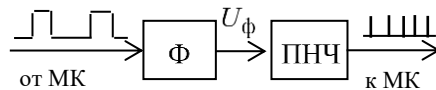


Рис. 3. Задатчик частоты интерполятора

Fig. 3. The interpolator frequency setter

Для МК с развитой периферией в качестве задатчика частоты интерполятора целесообразно использовать цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) совместно с преобразователем напряжения в частоту (ПНЧ). В качестве ЦАП можно использовать таймер в режиме сравнения, выход которого

подключен к простейшему  $R$ - $C$  фильтру  $\Phi$  (рис. 3). Таймер реализует функцию широтно-импульсного регулятора. Среднее значение напряжения на выходе фильтра при этом будет  $U_{\Phi} = U_0 \frac{N_i}{N_{\max}}$ , где  $U_0$  – напряжение пита-

ния;  $N_{\max} = 2^n$  – число состояний счетчика-таймера, зависящее от его разрядности;  $N_i = N_{i-1} + \Delta N$  – текущее значение кода развертки линейной зависимости на  $i$ -м интервале;  $\Delta N$  – приращение, определяющее темп изменения частоты ПНЧ. Для формирования участков разгона и торможения используется указатель  $K$  выхода на заданную частоту ПНЧ. При этом значение указателя  $K = K_m \cdot f_3 / f_m$ , где  $f_3, f_m$  – заданное и максимальное значение частоты отработки кадра;  $K_m = N_{\max} / \Delta N$  – число, соответствующее частоте  $f_m$  на выходе ПЧН.

Прерывания от таймера в этом случае должны иметь более высокий приоритет по отношению к прерываниям задатчика частоты интерполятора.

Главный алгоритм контроллера движения представлен на рис. 4. Обязательным этапом подготовки микроконтроллера к работе является инициализация его периферийных устройств [8]. На этапе инициализации определяется конфигурация контроллера для решения задач сопряжения с центральной микро-ЭВМ и драйверами силовых ключей коммутаторов шаговых двигателей.

Основная работа по подготовке управляющей программы осуществляется с помощью центральной микро-ЭВМ. После обработки и создания очереди кадров, в распределенных системах управления массив координат точек траектории загружается в контроллер движения. После загрузки массива координат центральный процессор устанавливает признак «Загрузка завершена», по которому контроллер осуществляет ввод данных кадра, и переходит на подпрограмму «Интерпретации движения». Затем в регистры состояния и управления загружаются признаки «Пуск» и «Разрешение прерываний» и осуществляется вход в цикл фоновой программы, условием выхода из которого является признак «Завершение кадра» ( $Cdr = End$ ). После этого производится ввод информации следующего кадра и проверка признака «Завершение работы», соответствующего символу конца управляющей программы.

Алгоритм интерпретации движения (рис. 5) включает в себя вычисление приращений  $\Delta X, \Delta Y$  координат, загрузку признаков  $\text{sgn}\Delta X, \text{sgn}\Delta Y$  знака приращений и формирования модулей  $|\Delta X|, |\Delta Y|$  приращений, которые загружаются по адресам переменных  $\alpha_k, \beta_k$  конечных приращений. В случае отрицательных приращений формируется их дополнительный код.

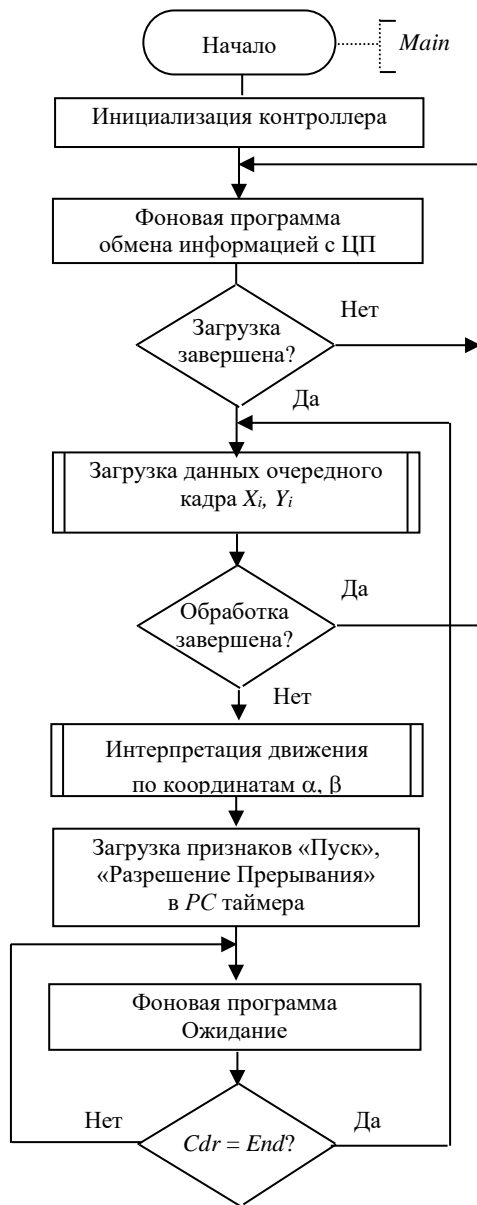


Рис. 4. Главный алгоритм контроллера

Fig. 4. The main algorithm of the controller



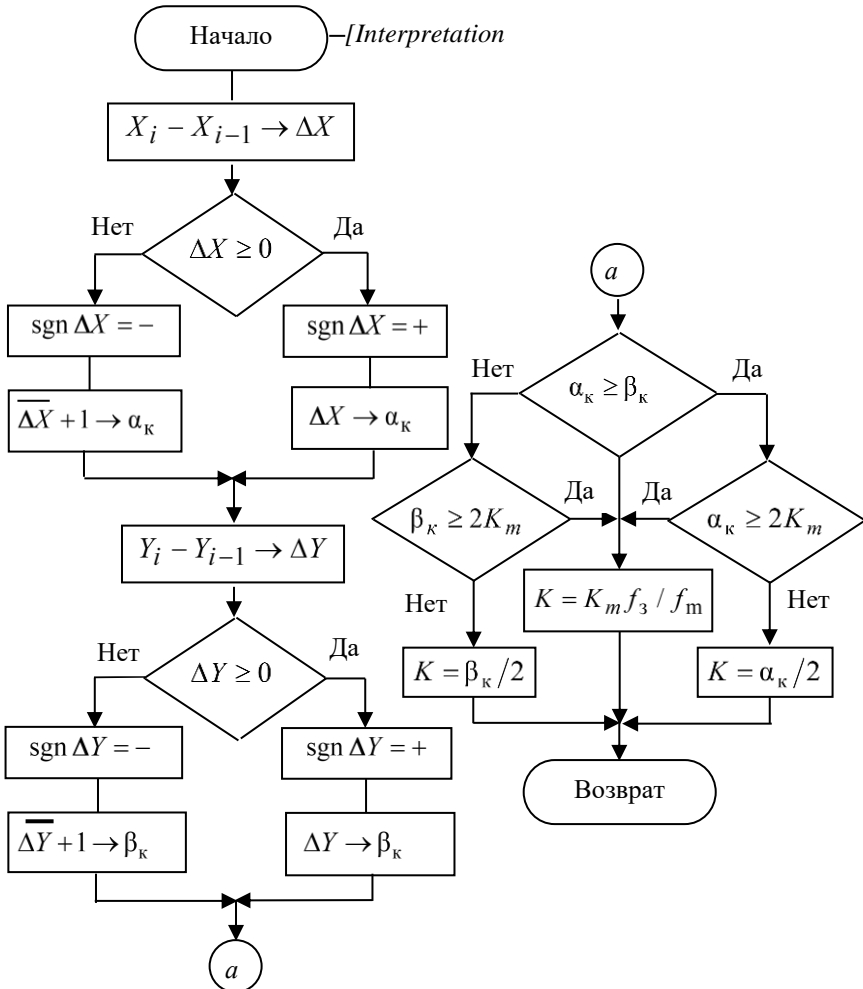


Рис. 5. Алгоритм интерпретации кадра

Fig. 5. Frame interpretation algorithm

В дополнительном фрагменте анализируются абсолютные значения приращения координат и определяется значение указателя  $K$ , соответствующего выходу на заданную частоту.

Алгоритм линейного интерполятора показан на рис. 6.

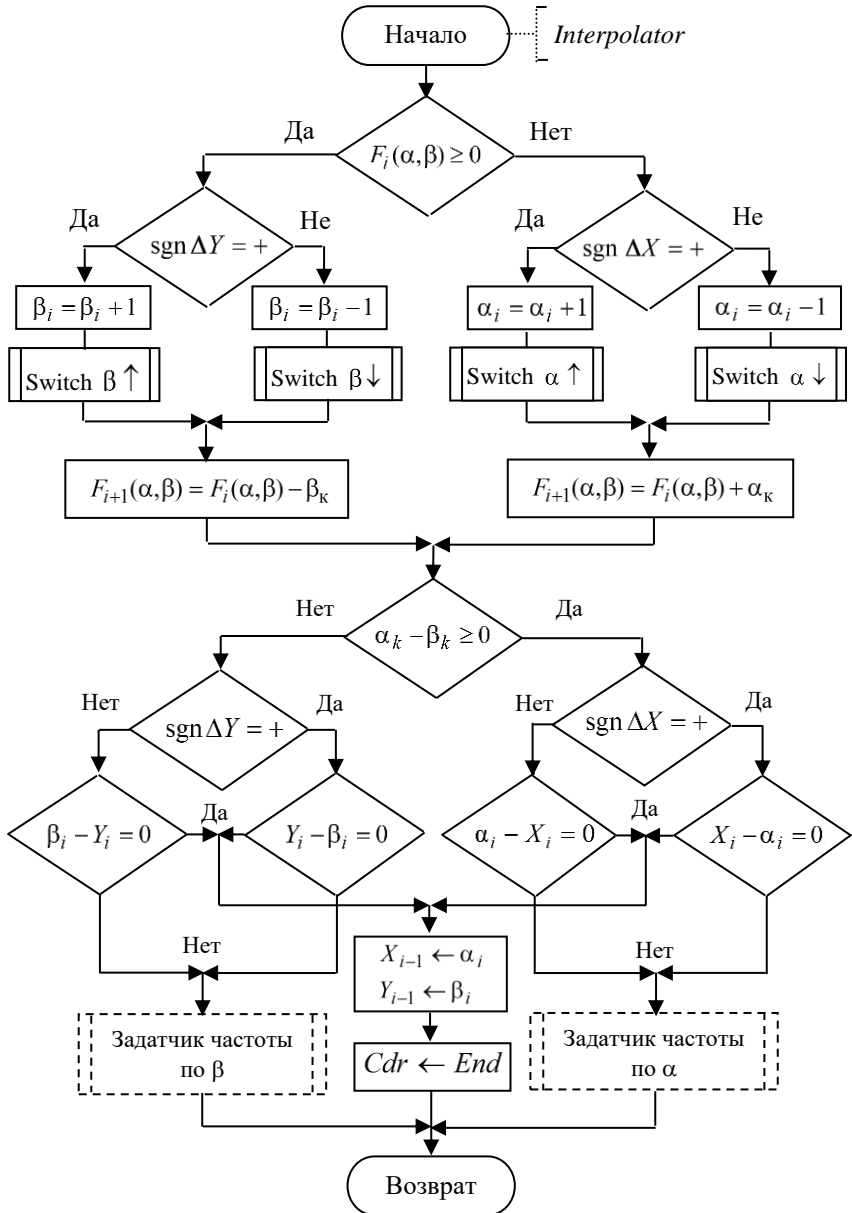


Рис. 6. Алгоритм линейного интерполятора

Fig. 6. Linear interpolator algorithm

Вход в алгоритм осуществляется по прерываниям, при этом выполнение фоновой программы приостанавливается. Вначале, в зависимости от знака оценочной функции, формируются две основные ветви решения, на которых анализируется знак приращений, формируется текущее значение обрабатываемых координат, производится вызов соответствующих программ «*Switch*» коммутации ШД и формируется новое значение оценочной функции. После этого сравниваются конечные значения координат участка траектории и производится анализ и формирование признака завершения «*Cdr = End*» отработки кадра по координате, имеющей наибольшее приращение. С помощью подпрограмм «Задатчика частоты» анализируются участки разгона, торможения и производится соответствующее изменение частоты входа в подпрограмму обслуживания прерывания. Штрихпунктирное выделение показывает возможный вариант вызова подпрограмм «Задатчика частоты» программным способом. В этом случае таймер работает в режиме делителя частоты. Второй вариант режима таймера предполагает вызов подпрограммы его обслуживания в произвольный момент времени по отношению к подпрограмме интерполятора. С учетом того, что тактовая частота МК выше частоты коммутации ШД на три и более порядков, возможное запаздывание существенным образом не влияет на выполнение программы интерполятора. Подпрограммы «*Switch*» коммутации обмоток ШД отличаются лишь направлением кольцевой выборки значений из одной таблицы коммутации. Стандартный режим работы ШД соответствует полношаговой или полушаговой коммутации. Для реализации микрошагового режима наиболее целесообразно использовать драйверы [9]. Математическое описание гибридных ШД и бесконтактных машин постоянного тока (БДПТ) подобно друг другу [10, 11]. Рассмотренные в данных работах принципы регулирования скорости в разомкнутых и замкнутых системах могут быть использованы при соответствующей доработке алгоритмов. В частности, с учетом свойств машин переменного тока, возможно зависимое регулирование частоты (рис. 3) и напряжения коммутатора ШД. В этом случае регулирование интервала перезагрузки регистра сравнения таймера можно обеспечить за счет подпрограммы его обслуживания.

#### IV. Заключение

В упрощенном варианте, с выводом графика траектории, основные алгоритмы были проверены в программном симуляторе системы команд процессора K1801BM2. Рассмотренные принципы отработки траектории позволяют работать как в правосторонней, так и в полной системе декартовых координат. Без существенного изменения алгоритмов, интерполятор может быть использован в качестве задатчика текущих значений координат сервоприводов, в которых регулирование частоты вращения ротора БДПТ

осуществляется за счет регулятора напряжения. При этом расширяются возможности регулирования напряжения, как в функции частоты, так и нагрузки за счет контроля углового рассогласования.

© Иванов В.М., 2023

*Поступила в редакцию 17.02.2023*

*Принята к печати 25.02.2023*

*Received 17.02.2023*

*Accepted 25.02.2023*

### Библиографический список

- [1] Koren Y. Interpolator for a computer numerical control system // *IEEE Transactions on Computers*. 1976. № 25 (1). С. 32-37. DOI: 10.1109/TC.1976.5009202
- [2] Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Системы числового программного управления. М.: Логос, 2005. – 296 с.
- [3] Байков В.Д., Вашкевич С.Н. Решение траекторных задач в микропроцессорных системах ЧПУ. Ленинград: Машиностроение, 1986. – 106 с.
- [4] Кошкин В.Л. Аппаратные системы числового программного управления. М.: Машиностроение, 1989. – 248 с.
- [5] Анишин Н.С. Цифровые интерполяторы криволинейных траекторий // *Автоматика и телемеханика*. 1986. № 12. С. 95-101.
- [6] Koren Y., Masory O. Reference-pulse circular interpolators for CNC systems // *Journal of Engineering for Industry*. 1981. № 103. P. 131-136.
- [7] Гусев Н.В., Букреев В.Г. Системы цифрового управления многокоординатными следящими электроприводами. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 213 с.
- [8] Баховцев И.А. Микропроцессорные системы управления устройствами силовой электроники: структуры и алгоритмы. Новосибирск: НГТУ, 2018. – 219 с.
- [9] User Manual DM542E 2-Phase Digital Stepper Drive. Revision 1.0 ©2016. China Leadshine Technology Co., Ltd. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.leadshunusa.com> (дата обращения 12.01.2023).
- [10] Иванов В.М. Исследование динамики следящего электропривода с вентильным двигателем в режиме автокоммутации // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2016. Т. 17. № 2. С. 110-115. DOI: 10.17587/mau.17.110-115
- [11] Иванов В.М. Исследование режимов работы шагового привода // *Интеллектуальная электротехника*. 2018. № 2. С. 53-63. DOI: 10.46960/2658-6754\_2018\_2\_53

### References

- [1] Y. Koren, "Interpolator for a computer numerical control system", *IEEE Transactions on Computers*, vol. 25, no. 1, pp. 32-37, Jan. 1976. DOI: 10.1109/TC.1976.5009202
- [2] V.L. Sosonkin and G.M. Martinov. *Sistemy chislovogo programmogo upravleniya [Numerical control systems]*. Moscow: Logos, 2005 (in Russian).

- [3] V.D. Baykov and S.N. Vashkevich, *Reshenie traektornykh zadach v mikroprocessornykh sistemah [Solution of trajectory problems in microprocessor-based CNC systems]*. Leningrad: Mashinostroenie, 1986 (in Russian).
- [4] V.L. Koshkin, *Apparatnye sistemy chislovogo upravleniya [Hardware systems of numerical control]*. Moscow. Mashinostroenie, 1989 (in Russian).
- [5] N.S. Anishin, “Cifrovye interpolatory krivolinejnykh traektorij [Digital interpolators of curvilinear trajectories]”, *Avtomatika i Telemekhanika*, no. 12, pp. 95-101, 1986 (in Russian).
- [6] Y. Koren and O. Masory, “Reference-pulse circular interpolators for CNC systems”, *Journal of Engineering for Industry*, vol. 103, pp.131-136, Feb. 1981.
- [7] N.V. Gusev and V.G. Bukreev. *Sistemy. cifrovogo upravleniya mnogokoordinatnymi sledyashchimi elektroprivodami [Systems of digital control of multi-coordinate tracking electric drives]*. Tomsk: TPU, 2007 (in Russian).
- [8] I.A. Bakhovtsev. *Mikroprocessornye sistemy upravleniya ustrojstvami silovoj elektroniki: struktury i algoritmy [Microprocessor control systems for power electronics devices: structures and algorithms]*. Novosibirsk: NSTU, 2018 (in Russian).
- [9] User Manual DM542E 2-Phase Digital Stepper Drive. Revision 1.0 ©2016. China Leadshine Technology Co., Ltd. [Online]. Available at: <http://www.leadshineusa.com> [Accessed: Jan. 12, 2023].
- [10] V.M. Ivanov, “Dynamics of the servo drive brushless DC motor in the auto switching mode”, *Mechatronics, Automation, Control*, vol. 17, no. 2, pp. 110-115, 2016. DOI: 10.17587/mau.17.110-115
- [11] V.M. Ivanov, “Research of step drive operation modes”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 53-63, 2018. DOI: 10.46960/2658-6754\_2018\_2\_53

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Иванов Владимир Михайлович**, кандидат технических наук, доцент Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Российская Федерация.

**Vladimir M. Ivanov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation.

---

---

**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА**

---

---

УДК 621.3.072.2

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_78

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА СТАБИЛИЗАЦИИ  
НАПРЯЖЕНИЯ ГОРОДСКОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА****Н.К. Третьяков**

ORCID: 0000-0003-4795-5181 e-mail: nt7836655@yandex.ru

Санкт-Петербургский государственный университет

аэрокосмического приборостроения

*Санкт-Петербург, Россия***В.П. Кузьменко**

ORCID: 0000-0002-0270-4875 e-mail: mr.konnyy@gmail.com

Санкт-Петербургский государственный университет

аэрокосмического приборостроения

*Санкт-Петербург, Россия***О.Я. Солёная**

ORCID: 0000-0003-4901-3884 e-mail: osolenaya@guap.ru

Санкт-Петербургский государственный университет

Аэрокосмического приборостроения

*Санкт-Петербург, Россия*

Представлены результаты практических измерений амплитудного значения напряжения электросети постоянного тока. Выявлены несоответствия значениям, установленным современными нормативно-техническими документами. Проведенный анализ существующего решения показал необходимость разработки нового подхода к решению проблемы. Рассмотрена возможность стабилизации напряжения электросети постоянного тока путем распределения электроэнергии импульсным преобразователем. В *Matlab/Simulink* выполнено компьютерное моделирование устройства стабилизации напряжения с учетом особенностей электросети. Модель содержит и учитывает необходимые для построения программной части системы управления переходные процессы. Проведен анализ возможности проектирования устройства стабилизации напряжения на современной отечественной компонентной базе. Полученные результаты моделирования подтвердили возможность стабилизации напряжения электросети с диапазоном  $\pm 15\%$  от номинального (600 В), а также целесообразность разработки устройства.

**Ключевые слова:** городская электросеть постоянного тока, источник напряжения, источник тока, качество электрической энергии, стабилизация напряжения.

**Для цитирования:** Третьяков Н.К., Кузьменко В.П., Солёная О.Я. Моделирование устройства стабилизации напряжения городской электросети постоянного тока // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 4. С. 78-89.

DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_78

## SIMULATION OF VOLTAGE STABILIZATION DEVICE OF URBAN DC ELECTRIC NETWORK

**N.K. Tretyakov**

ORCID: 0000-0003-4795-5181 e-mail: nt7836655@yandex.ru

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

*Saint-Petersburg, Russia*

**V.P. Kuzmenko**

ORCID: 0000-0002-0270-4875 e-mail: mr.konnny@gmail.com

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

*Saint-Petersburg, Russia*

**O.Ya. Solenaya**

ORCID: 0000-0003-4901-3884 e-mail: osolenaya@guap.ru

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

*Saint-Petersburg, Russia*

**Abstract.** The results of practical measurements of the amplitude range of the voltage of the DC electric network are presented. Inconsistencies with the values established by modern regulatory and technical documents are revealed. The analysis of the existing solution showed the need to develop a new approach to solving this problem. The possibility of stabilizing the voltage of the DC electric network by distributing electrical energy by a pulse converter is considered. A simulation of a voltage stabilization device in Matlab/Simulink has been performed, taking into account the features of the electric network. The model contains and takes into account the transients necessary for the construction of the software part of the control system. The analysis of the possibility of designing a voltage stabilization device on a modern domestic component base is carried out. The obtained results confirmed the possibility of stabilizing the mains voltage in a range of  $\pm 15\%$  of the nominal (600 V), as well as the feasibility of device developing.

**Keywords:** DC network, current source, power quality, voltage source, voltage stabilization.

**For citation:** N.K. Tretyakov, V.P. Kuzmenko and O.Ya. Solenaya, "Simulation of voltage stabilization device of DC urban electric network", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 78-89, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_78

## 1. Введение

Городской электротранспорт (трамваи, троллейбусы, метро) питается от пассивных выпрямительных подстанций, подключенных к распределительным сетям среднего напряжения. В качестве современного тягового устройства трамваев в основном используют асинхронные электродвигатели переменного тока, приводимые в действие преобразователями частоты, питающимися от сети постоянного тока напряжением 400-700 В [1-3]. Поскольку тяговые преобразователи подключены непосредственно к контактной сети, такие процессы как разгон и торможение влияют на амплитудное значение напряжения, что является серьезной проблемой [4-6].

Одним из важнейших параметров электронных устройств, применяемых в электротранспорте, является диапазон входного напряжения, который, согласно ГОСТ 29322-2014 (IEC 60038:2009), для систем постоянного тока номинальным напряжением 600 В равен 400-720 В [7]. При пониженном напряжении питания электронное устройство не гарантирует поддержание заданных параметров или находится в режиме ожидания, при повышении возможен выход из строя, так как применяемые компоненты имеют определенный класс изоляции. Так, согласно данным компании «ORTEA», зафиксирован неоднократный выход из строя оборудования французских трамваев консорциума «Alstom» из-за скачков напряжения контактной электросети.

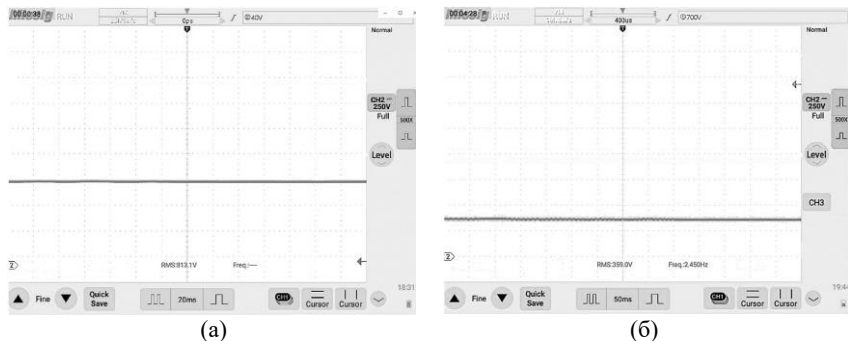
## II. Практические измерения

На рис. 1 представлены измерения напряжения городской электросети постоянного тока с полученными максимальным и минимальным значениями амплитуды напряжения 813 В и 359 В, где вертикальная ось – напряжение ( $U$ , В), горизонтальная – время ( $t$ , мс). Для определения значения напряжения выполнена настройка автоматического выведения значения  $RMS$  измеряемого канала. Измерения проводились в г. Санкт-Петербург с приблизительной удаленностью от тяговой подстанции равной 3 км цифровым осциллографом планшетного типа *Micsig STO1104C Plus* с высоковольтным пробником *Micsig DP20003* непосредственно на пантографе (токоприемник с подъемным механизмом для подключения к электросети) городского трамвая относительно корпуса в дневной пик потока пассажиров.

Полученные измерения показали несоответствие требованиям современных нормативно-правовых актов, что доказывает необходимость проведения работ по исследованию возможности повышения качества электрической энергии сетей постоянного тока в заданном амплитудном диапазоне напряжений [8, 9]. Стоит отметить, что существующее решение [10] имеет ряд недостатков, среди которых: значительная доработка тяговых подстанций для внедрения системы стабилизации; ограниченный рабочий диапазон



напряжений, так как устройство работает как понижающий инвертор; высокие потери, обусловленные постоянным режимом работы устройства; мощность изделия, равная мощности электросети, требующая применения силовых полупроводниковых компонентов; отключение электросети при выходе из строя преобразователя.



**Рис. 1. Осциллограммы максимального (а) и минимального (б) напряжения городской электросети**

**Fig. 1. Oscillograms of the maximum (a) and minimum (b) voltage of the city power grid**

### **III. Стабилизация напряжения электросети постоянного тока посредством распределения энергии**

В качестве решения поддержания амплитуды напряжения электросети в заданном диапазоне предлагается использование импульсного преобразователя энергии, выполняющего функцию распределения энергии. При повышении напряжения сети, где основным источником является рекуперация тяговых преобразователей электротранспорта, преобразователь выполняет функцию источника тока, заряжая аккумуляторную батарею (АКБ), что понижает напряжение электросети. При понижении напряжения сети устройство переходит в режим источника напряжения, направляя энергию с АКБ в сеть, чем поднимает напряжение электросети. Устройство представляет собой подключенный к сети двунаправленный инверторный преобразователь, построенный по схеме полный мост с звеном постоянного тока (ЗПТ). Преобразователь построен на модулях силовых транзисторов, *MOSFET* или *IGBT*, подключенных по схеме полумоста, ЗПТ – параллельно и/или последовательно подключенные электролитические или пленочные конденсаторы (рис. 2).

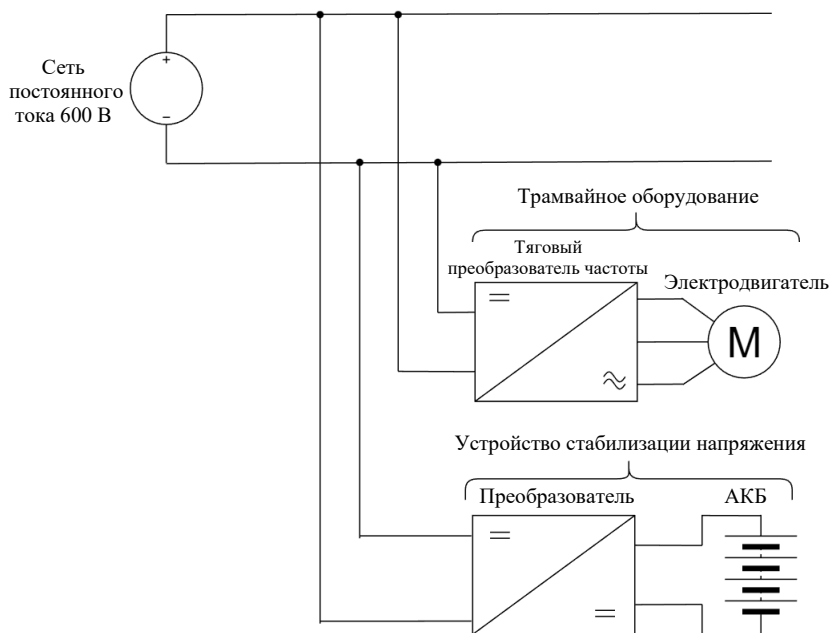


Рис. 2. Структурная схема подключения устройства стабилизации к электросети

Fig. 2. Structural diagram of connecting the stabilization device to electrical networks

Значительными преимуществами данного решения стабилизации напряжения являются: отсутствие необходимости значительной доработки действующей инфраструктуры электросети; возможность параллельной работы устройств для повышения мощности; безопасность эксплуатации (выход из строя устройства не ведет к отключению электросети).

#### IV. Моделирование устройства стабилизации напряжения городской электросети постоянного тока

Для подтверждения возможности стабилизации напряжения электросети предлагаемым путем необходимо выполнить моделирование работы устройства и его воздействия на сеть с фактически измеренными параметрами (рис. 1), где максимальное и минимальное значение напряжения примерно равны 806 В и 350 В соответственно.

На рис. 3 представлена модель городской электросети ограниченной мощности номинальным напряжением 600 В в *Matlab Simulink* при работе на нагрузку, имитирующую тяговый преобразователь электротранспорта, с измеренными амплитудными значениями напряжения.

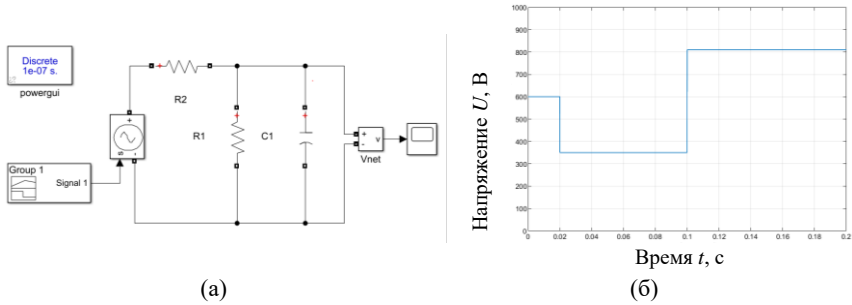


Рис. 3. Схема (а) и осциллограмма (б) модели работы электросети ограниченной мощности на нагрузку

Fig. 3. Scheme (a) and oscillograms (b) of the model of operation of the power network of limited power to the load

Очевидно, что емкости конденсаторов преобразователя недостаточно для сглаживания пульсаций напряжения сети. Кроме того, изменение напряжения сети влечет за собой повышение требований к электронным устройствам в области поддержания выходных параметров [11, 12].

На рис. 4 представлена модель устройства стабилизации напряжения электросети, параметры которой приведены в табл. 1.

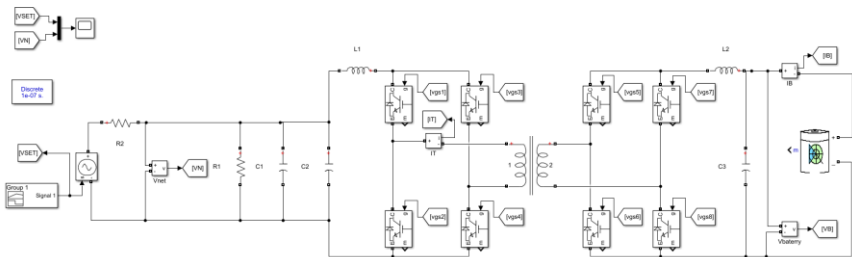


Рис. 4. Схема модели сети и устройства стабилизации напряжения электросети в *Matlab Simulink*

Fig. 4. Diagram of the network model and the device for stabilizing the voltage of the power network in the *Matlab Simulink*

## V. Анализ результатов моделирования

На рис. 5 представлены осциллограммы напряжения сети при работе устройства стабилизации (красная) и задания напряжения источника, имитирующего электросеть ограниченной мощности (синяя).

Таблица 1.  
 Параметры блоков модели

Table 1.  
 Model block parameters

Наименование блока	Параметр	Единица измерения	Значение
<i>Series RLC Branch</i> (C1, C2, C3)	Емкость	мФ	2
	Номинальное напряжение при инициализации модели	В	600
<i>Series RLC Branch</i> (L1, L2)	Индуктивность	мкГн	100
<i>Linear Transformer</i>	Частота	кГц	8
	Соотношение витков	Единицы	1:1
	Номинальная мощность	кВт	100
<i>Battery</i>	Номинальное напряжение	В	600
	Номинальная емкость	А·ч	200

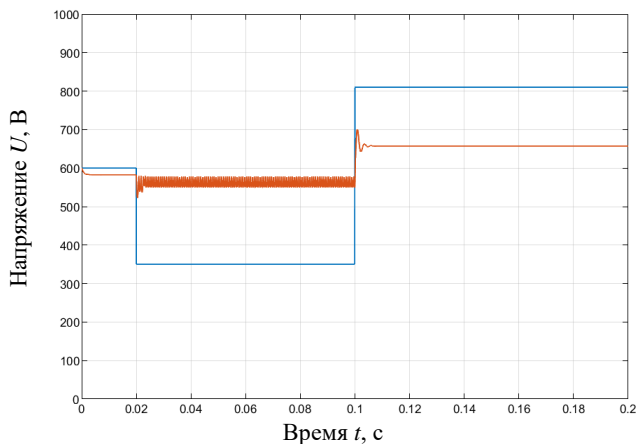


Рис. 5. Осциллограммы напряжения электросети при работе устройства

Fig. 5. Oscillograms of mains voltage during operation of the device

Моделирование устройства стабилизации напряжения городской электросети постоянного тока оказалось успешным в рамках задачи поддержания амплитуды напряжения электрической цепи в заданном диапазоне. Преобразователь функционировал как распределитель энергии, заряжая аккумулятор для снижения напряжения электросети, когда напряжение повышалось из-за рекуперации тяговых преобразователей электротранспорта.

Когда сетевое напряжение понижалось, преобразователь переключался в режим источника напряжения, направляя энергию от аккумуляторной батареи в сеть для повышения сетевого напряжения.

Устройство представляет собой двунаправленный импульсный преобразователь, построенный по схеме полного моста с подключением постоянного тока (DCT) и сконструированный из модулей силовых IGBT транзисторов, соединенных по схеме полумоста, ЗПТ – из параллельно соединенных пленочных конденсаторов.

Имитация работы устройства проводилась на модели городской электросети с ограниченной пропускной способностью номинальным напряжением 600 В и крайними значениями с использованием *Matlab Simulink*. Нагрузка имитировала тяговый преобразователь электротранспорта.

Результаты показали, что устройство стабилизации напряжения было эффективным в поддержании амплитуды напряжения электрической цепи в требуемом диапазоне. Устройство функционировало по назначению, переключаясь между режимом источника тока и режимом источника напряжения в зависимости от уровня напряжения в электросети. Измеренные значения амплитуды напряжения соответствовали желаемому диапазону, указывая на то, что устройство смогло стабилизировать уровни напряжения городской электросети постоянного тока.

В целом результаты моделирования продемонстрировали эффективность предлагаемого решения применения импульсного преобразователя энергии для стабилизации напряжения в городских электросетях постоянного тока. Однако, очевидно, требуется дальнейшее тестирование и оценка точности и надежности моделирования для выявления любых потенциальных ограничений или областей для улучшения.

Время моделирования уменьшено до 0,2 с для возможности просчета переходных процессов устройства. В момент времени 0,02 с и 0,1 с напряжение электросети принимает крайние, фактически измеренные, значения напряжения примерно равные 350 В и 810 В. Устройство выполняет функцию стабилизации напряжения путем распределения энергии между электросетью и АКБ. Важно отметить, что идеально стабилизировать сеть до номинального значения напряжения равного 600 В невозможно по следующим причинам: частота работы преобразователя; высокая мощность; скорость работы регулятора; ограниченная емкость АКБ; ограничение тока транзисторов; номинальные (реальные) значения емкостных и индуктивных элементов модели.

Результаты моделирования подтвердили возможность стабилизации напряжения электросети постоянного тока с диапазоном отклонения, не превышающим  $\pm 15\%$  от номинального значения, что соответствует требованиям ГОСТ 6962–75 [3].

## VI. Возможность практической реализации на отечественной электронно-компонентной базе

Эффективность работы изделия зависит от качества электронно-компонентной базы. В современных условиях самым надежным поставщиком является отечественный производитель.

Основными силовыми компонентами преобразователя являются *IGBT/MOSFET* транзисторы, емкости и моточные изделия (дроссель и трансформатор). Благодаря применению *IGBT* транзисторов производителя АО «Ангстрем» или АО «Протон-Электротекс», например, *AnM200HBEV17H / MIAA-HB17SA-300N* 62 корпус, можно добиться значительного повышения надежности изделия [13]. Транзисторы данного типа имеют возможности удержания тока короткого замыкания до 40 мкс, диапазон входных напряжений до 1700 В и рабочую частоту 1-20 кГц. При разработке моточных изделий предлагается использовать продукцию ПАО «Мстатор»: *MSTN-120A-TH / MSTN-90S-TH* для трансформатора, АРН57Р60 для дросселя. Чтобы добиться снижения масса-габаритных показателей и увеличения номинального рабочего напряжения можно использовать емкости производителя ООО «НЮКОН», например, серии *FA3, SPC, FB3*.

## VII. Заключение

Проведенное исследование показывает возможность стабилизации напряжения электросети в соответствии заданным по ГОСТ 29322–2014 (*IEC 60038:2009*) [7] значениям, с диапазоном  $\pm 15\%$  от номинального (600 В) путем распределения энергии посредством применения импульсных преобразователей электрической энергии. Поддержание номинального напряжения электросети подтверждает возможность повышения полезного ресурса эксплуатации применяемого оборудования, а также снижения требований к разрабатываемому. Модель содержит и учитывает все необходимые для построения программной части системы управления переходные процессы.

Изложенные в работе исследования подтверждают необходимость и целесообразность развития направления распределения энергии в городских электросетях для повышения качества электрической энергии. Следующий шаг – поиск оптимальной аппаратной части и разработка макетного образца устройства стабилизации напряжения.

© Третьяков Н.К., 2023

© Кузьменко В.П., 2023

© Солёная О.Я., 2023

Поступила в редакцию 01.03.2023

Принята к публикации 02.05.2023

Received 01.03.2023

Accepted 02.05.2023

**Библиографический список**

- [1] Троллейбусы – Электродпривод // ООО НПП ЭПРО. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nprepro.ru/index.php?page=elektroprivod> (дата обращения 07.10.2022).
- [2] Воробьев А.А., Будюкин А.М., Кондратенко В.Г. Анализ современных технических решений, применяемых в конструкциях низковольтных трамвайных вагонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2021. Т. 18. № 1. С. 1-15. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-1-7-15
- [3] ГОСТ 6962-75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Введ. 1975-11-14. М.: Издательство стандартов, 1976. – 3 с.
- [4] Naseri F., Farjah E. and Ghanbari T. An efficient regenerative braking system based on battery/supercapacitor for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles with BLDC motor // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 66. No. 5. P. 3724-3738. DOI: 10.1109/TVT.2016.2611655
- [5] Ghanbari T., Farjah E. and Naseri F. Power quality improvement of radial feeders using an efficient method // Electric Power Systems Research. 2018. Vol. 163. P. 140-153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.05.027>
- [6] Naseri F., Farjah E., Kazemi Z., Schaltz E., Ghanbari T., Schanen J-L. Dynamic stabilization of DC traction systems using a supercapacitor-based active stabilizer with model predictive control // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2020. Vol. 6. No. 1. P. 228-240. DOI: 10.1109/TTE.2020.2964423
- [7] ГОСТ 29322-2014 (IEC 60038:2009). Напряжения стандартные. Введ. 2015-10-01. М.: Стандартинформ, 2015. – 9 с.
- [8] SIST EN 50160:2011/A1:2015. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. Approved 2015-03-03.
- [9] Кузьменко В.П., Солёный С.В., Шишлаков В.Ф., Солёная О.Я. Измерение качества электроэнергии в системе электроснабжения со светодиодными осветительными устройствами // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2019. № 1 (74). С. 197-212. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-197-212
- [10] Шапиро С.В., Муфтиев С.Р. Разработка системы стабилизации напряжения тяговой подстанции городского электротранспорта // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2010. Т. 14. № 5 (40). С. 79-85.
- [11] Сайфутдинов Р.Ф., Вильданов Р.Г., Бузаева Е.К., Ширококов Е.Д. Оборудование для создания цифровой подстанции городских электрических сетей в рамках Smart Grid // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 9 (87). С. 29-33.
- [12] Zolotov I.I., Shevtsov A.A., Mkrtychev S.V. Simulation model of dynamic voltage stabilizer for autonomous power supply systems // proc. Information technologies in business and industry, Feb. 18-20, 2019, Novosibirsk, Russia.: IOP Publishing, 2019. P. 062034. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062034
- [13] Информационный лист IGBT модуля // АО «Протон-Электротекс» [Электронный ресурс]. URL: <https://proton-electrotex.com/IGBT-MIAA-HB17SA-300N> (дата обращения 12.11.2022).

## References

- [1] Trolleybus – Elektroprivod [Trolleybuses – Electric drive]. [Online]. Available at: <http://www.nppepro.ru/index.php?page=elektroprivod> [Accessed: Oct. 2, 2017] (in Russian).
- [2] A.A. Vorobyov, A.M. Budyukin and V.G. Kondratenko, “Analysis of current technical solutions applied in the design of low-floor tram cars”, *Bulletin of the Petersburg University of Communications*, vol. 18, no. 1, pp. 1-15, 2021. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-1-7-15
- [3] Transport electrified with power from the contact network, GOST 6962-75, Nov. 1975.
- [4] F. Naseri, E. Farjah and T. Ghanbari, “An efficient regenerative braking system based on battery/supercapacitor for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles with BLDC motor,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 5, pp. 3724-3738, May 2017. DOI: 10.1109/TVT.2016.2611655
- [5] T. Ghanbari, E. Farjah and F. Naseri, “Power quality improvement of radial feeders using an efficient method,” *Electric Power Systems Research*, vol. 163, pp. 140-153, Oct. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.05.027>
- [6] F. Naseri, E. Farjah, Z. Kazemi, E. Schaltz, T. Ghanbari, J-L. Schanen, “Dynamic stabilization of DC traction systems using a supercapacitor-based active stabilizer with model predictive control”, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 1, pp. 228-240. Mar. 2020. DOI: 10.1109/TTE.2020.2964423
- [7] Voltages are standard, GOST 29322-2014 (IEC 60038:2009), October 2015.
- [8] Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, SIST EN 50160:2011/A1:2015, Mar. 2015.
- [9] V.P. Kuzmenko, S.V. Solonny, V.F. Shishlakov and O.Ya. Solonaya, “Measurement of power quality in the power supply system with led lightning devices”, *Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, vol. 1, no. 74, pp. 197-212, 2019. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-197-212
- [10] S.V. Shapiro and S.R. Muftiyev, “System engineering of stabilization of pressure of traction substation of city electrotransport”, *Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*, vol. 14, no. 5 (40), pp. 79-85, 2010.
- [11] R.F. Sayfutdinov, R.G. Vil'danov, Ye.K. Buzayeva and Ye.D. Shirobokov, “Equipment for creation of digital substation of city electric networks within smart grid”, *Science and business: ways of development*, vol. 9, no. 87, pp. 29-33, 2018.
- [12] I.I. Zolotov, A.A. Shevtsov and S.V. Mkrtychev, “Simulation model of dynamic voltage stabilizer for autonomous power supply systems”, in proc. *Information technologies in business and industry*, Feb. 18-20, 2019, Novosibirsk, Russia, pp. 062034. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062034
- [13] Informacionnyj list IGBT modulya [Information sheet of the IGBT module]. [Online]. Available at: URL: <https://proton-electrotex.com/IGBT-MIAA-HB17SA-300N> [Accessed: Nov. 2, 2022] (in Russian).



**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ  
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Третьяков Никита Константинович**, студент Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

**Nikita K. Tretyakov**, student of the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation Saint-Petersburg, Russian Federation.

**Кузьменко Владимир Павлович**, кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

**Vladimir P. Kuzmenko**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation Saint-Petersburg, Russian Federation.

**Солёная Оксана Ярославовна**, кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

**Oksana Ya. Solenaya**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation Saint-Petersburg, Russian Federation.

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОБЩЕМ ПЕРВИЧНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

**В.А. Фёдорова**

ORCID: 0009-0005-9607-5713 e-mail: win.victoria08@mail.ru

Новосибирский государственный технический университет  
*Новосибирск, Россия*

**В.Ф. Кириченко**

e-mail: viktorkirichenko-v@mail.ru

Новосибирский государственный технический университет  
*Новосибирск, Россия*

**Г.В. Глазырин**

e-mail: glazyring@gmail.com

Новосибирский государственный технический университет  
*Новосибирск, Россия*

Общее первичное регулирование частоты (ОПРЧ) энергосистемы осуществляется в целях ограничения отклонений частоты от номинального значения для безопасной эксплуатации электростанций и минимизации риска отключения потребителей электроэнергии действием противоаварийной автоматики. Требования к первичному регулированию частоты изложены в ГОСТ 55890-2013. В частности, регламентируются: статизм, который должен находиться в пределах от 4 до 6 %, и минимальное время набора/сброса мощности электростанциями. Практика показывает, что в некоторых случаях аварийные возмущения в энергосистемах приводят к незатухающим колебаниям частоты с последующим излишним отключением потребителей и генерации. Например, при наладке групповых регуляторов активной мощности в энергосистеме Норильско-Таймырской энергетической компании устойчивого ОПРЧ удалось добиться при статизме, равном 25 %, что не соответствует ГОСТ. Поэтому необходим детальный анализ процессов при ОПРЧ и разработка новых методов регулирования.

**Ключевые слова:** колебания частоты, переходные процессы, синхронный генератор, способ регулирования, устойчивость энергосистемы, частота.

**Для цитирования:** Фёдорова В.А., Кириченко В.Ф., Глазырин Г.В. Разработка математической модели для исследования переходных процессов при общем первичном регулировании частоты в энергосистемах // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 4. С. 90-107. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_90

# MATHEMATICAL MODEL DEVELOPMENT FOR STUDY OF TRANSIENTS IN POWER SYSTEMS GENERAL PRIMARY FREQUENCY CONTROL

**V.A. Fyodorova**

ORCID: 0009-0005-9607-5713 e-mail: [win.victoria08@mail.ru](mailto:win.victoria08@mail.ru)

Novosibirsk State Technical University

*Novosibirsk, Russia*

**V.F. Kirichenko**

e-mail: [viktorkirichenko-v@mail.ru](mailto:viktorkirichenko-v@mail.ru)

Novosibirsk State Technical University

*Novosibirsk, Russia*

**G.V. Glazyrin**

e-mail: [glazyring@gmail.com](mailto:glazyring@gmail.com)

Novosibirsk State Technical University

*Novosibirsk, Russia*

**Abstract.** General primary frequency control (GPFC) of the power system limits frequency deviations from the nominal value for the safe operation of power plants and minimize the risk of disconnection of electricity consumers by the action of emergency automatics. The requirements for GPFC regulate the droop, which should be in the range from 4 to 6 %, and the minimum time for power up / down power by power plants. In this case, the maximum rate of power change and other characteristics of the transients are not limited. At the same time, practice shows that in some cases, emergency disturbances in power systems lead to undamped frequency fluctuations, followed by excessive disconnection of consumers and generation. For example, a stable GPFC during adjusting group active power controllers in the energy system of Norilsk-Taimyr energy company was achieved only with a droop equal to 25 %, which does not meet the requirements. Thus, there is a need for a detailed analysis of the processes in the GPFC and the development of new improved control methods.

**Keywords:** control method, frequency, frequency fluctuations, power system stability, transient processes, synchronous generator.

**For citation:** V.A. Fyodorova, V.F. Kirichenko and G.V. Glazyrin, “Mathematical model development for study of transients in power systems general primary frequency control”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 90-107, 2023.

DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_90

## I. Введение

Первичное регулирование частоты (первичное регулирование) – процесс автоматического изменения мощности генерирующего оборудования

под действием первичных регуляторов, вызванный изменением частоты и направленный на уменьшение этого изменения. При этом первичными регуляторами являются автоматические регуляторы частоты вращения турбин и регуляторы активной мощности, обеспечивающие первичное регулирование генерирующего оборудования. Первичное регулирование должно осуществляться с целью ограничения отклонений частоты от номинального значения для безопасной эксплуатации электростанций и минимизации риска отключения энергопринимающих установок потребителей электрической энергии действием противоаварийной автоматики. Все генерирующее оборудование должно участвовать в общем первичном регулировании частоты (ОПРЧ), за исключением энергоблоков атомных электростанций с реакторами типа РБМК и БН. Участие генерирующего оборудования в ОПРЧ должно осуществляться с характеристиками, удовлетворяющими требованиям к участию в ОПРЧ [1-3].

Вторичное регулирование частоты и перетоков активной мощности (вторичное регулирование) – процесс автоматического или оперативного изменения активной мощности генерирующего оборудования для восстановления заданного значения частоты или заданного значения внешнего перетока области регулирования.

Третичное регулирование мощности (третичное регулирование) – процесс изменения активной мощности генерирующего оборудования в целях восстановления резервов вторичного регулирования.

Частота генератора регулируется на разных этапах его работы. Это может быть, как частотное регулирование для подключения генератора к сети для параллельной работы (синхронизация), так и частотное регулирование работающего генератора для устранения аварийных ситуаций в энергосистеме. Более подробно процесс регулирования частоты для синхронизации генератора можно найти в [4, 5]. В данной статье описаны особенности регулирования режимных характеристик работающего генератора для изменения частоты объединенной энергосистемы.

Качество частоты напряжения и тока в энергосистеме определяются, в том числе, качеством первичного регулирования частоты, которое обеспечивается средствами систем автоматического регулирования (САР) турбин.

На практике некоторые аварийные возмущения в энергосистеме приводят к тому, что процесс первичного регулирования частоты может сопровождаться незатухающими колебаниями частоты с последующим излишним отключением потребителей и генерации. За последние несколько лет зарегистрирован целый ряд аварийных событий с участием крупнейших гидроэлектростанций (ГЭС) и тепловых электростанций (ТЭС) во всем мире, которые сопровождались незатухающими колебаниями, вызванными работой САР турбин в составе этих электростанций.

Большой вклад в исследования по направлению регулирования частоты в электроэнергетических системах внесли [6, 7]. Авторы отмечают, что за последние несколько лет произошел ряд аварийных событий, в которых процесс регулирования сопровождался значительными колебаниями частоты. Причиной появления незатухающих колебаний могут быть регуляторы частоты (РЧ), имеющие обратную связь по активной мощности генератора. Результаты расчетов показывают, что при использовании обратной связи по активной мощности возможно нарушение устойчивости. При этом в колебательном процессе наблюдается общее движение частоты и угла обоих генераторов большой величины при относительно небольшой величине взаимного движения частоты и угла генераторов.

Предотвращение возникновения незатухающих колебаний в изолированных энергосистемах возможно путем соответствующей настройки регуляторов скорости вращения турбин. Повышенные требования к точности обработки первичной мощности при изменениях частоты обуславливают реализацию производителями оборудования режима регулирования отклонения электрической мощности от заданной с учетом частотной коррекции по ПИ-закону.

Большой вклад в исследование регулирования частоты в энергосистемах с большим содержанием гидрогенерации внесли [8-10]. Авторы рассматривают сверхнизкочастотные колебания (УНЧК) в ряде энергосистем с высокой долей гидрогенерации. Работы представляют описание асинхронного соединения двух энергосистем с возникновением длительного периода сверхнизкочастотных колебаний, что серьезно повлияло на безопасную и стабильную работу всей системы. Авторами сравниваются и анализируются характеристики частотного регулирования паровой турбины и гидрогенератора. Анализ показывает, что сверхнизкочастотные колебания вызваны полупериодными противорегулирующими характеристиками турбины. За счет совместной настройки *FLC* и основного диапазона частотной модуляции характеристики частотной модуляции системы оптимизируются.

В [11, 12] обсуждается стратегия противоаварийного управления ультранизкочастотными колебаниями (УНЧК). Усилить демпфирование энергосистемы возможно, переключая режимы управления регулятора или напрямую выведя регулятор из эксплуатации. Для онлайн-идентификации низкочастотных колебаний и получения частоты и коэффициента затухания может быть использован метод Прони.

Другой эффективной мерой повышения эффективности первичного регулирования частоты энергосистемы является усовершенствованное управление с обратной связью с помощью многофункциональных многодиапазонных стабилизаторов энергосистемы (*PPS*) [13, 14]. Кроме того, *PPS*

имеет множество преимуществ: большое количество настраиваемых параметров для достижения нужных фазовых характеристик и уровней усиления/ослабления в широком диапазоне частот, участие в первичной регулировке частоты и улучшение стабильности частоты за счет воздействия на нагрузку системы.

Следовательно, проведенный анализ показывает, что существующие исследования в качестве меры повышения эффективности первичного регулирования частоты, в основном, рассматривают более детальную настройку или использование усовершенствованных контроллеров частоты. Однако, необходимо рассмотреть и возможность совершенствования самих законов регулирования, что и будет представлено в рамках данного исследования. Основная цель исследования – совершенствование методов общего первичного регулирования частоты энергосистем. Можно представить следующие задачи исследования:

- 1) исследование и анализ существующих методов, алгоритмов и систем для осуществления ОПРЧ. Выявление их преимуществ и недостатков;
- 2) моделирование переходных процессов при ОПРЧ энергосистем;
- 3) исследование устойчивости и качества переходных процессов ОПРЧ при различных законах управления генерирующим оборудованием;
- 4) разработка методов ОПРЧ, обеспечивающих устойчивость и качество регулирования.

Данная статья посвящена первой и второй задачам. Для возможности разработки усовершенствованных методов первичного регулирования частоты первоначально необходимо визуализировать возникновение переходных процессов и колебаний частоты при осуществлении регулирования объединенной энергосистемой, состоящей из двух источников генерации.

## **II. Требования к ОПРЧ энергосистем**

К первичному регулированию предъявляют следующие требования [15]:

- зона нечувствительности не должна превышать 0,05 Гц для генерирующего оборудования с турбинами, оснащенными электрогидравлическими регуляторами, и не должна превышать 0,15 Гц для генерирующего оборудования с турбинами, оснащенными гидравлическими регуляторами;
- «мертвая полоса» первичного регулирования не должна превышать  $(50 \pm 0,075)$  Гц;
- статизм первичного регулирования должен находиться в пределах 4-5 % для энергоблоков с паровыми и газовыми турбинами и в пределах 4,5-6 % для гидротурбин.

Проверка и подтверждение готовности генерирующего оборудования к участию в ОПРЧ должны осуществляться в соответствии с требованиями, установленными ОАО «СО ЕЭС».

Маневренные характеристики генерирующего оборудования ТЭС (кроме ПГУ) должны удовлетворять следующим требованиям. При отклонении частоты величиной 10 % и менее номинальной мощности генерирующего оборудования, должно обеспечиваться гарантированное участие генерирующего оборудования в ОПРЧ в пределах регулировочного диапазона. При этом в случае скачкообразного отклонения частоты должна обеспечиваться:

– реализация не менее половины требуемой первичной мощности за время не более 15 с;

– реализация всей требуемой первичной мощности за время не более 5-7 мин в зависимости от типа энергоблока.

Для участия в ОПРЧ маневренные характеристики генерирующего оборудования ГЭС должны удовлетворять следующим требованиям. При отклонении частоты должно обеспечиваться гарантированное участие генерирующего оборудования в ОПРЧ во всем регулировочном диапазоне. При этом в случае скачкообразного отклонения частоты должна обеспечиваться реализация всей требуемой первичной мощности за время не более 1 мин.

Для качественной оценки участия электростанций в ОПРЧ могут быть применены следующие критерии [16].

1. «Адекватная» – характеризуется обратным изменению частоты пропорциональным изменением активной мощности генерирующего оборудования.

2. «С провалом» – начальная реакция соответствует «адекватной», однако через определенное время при сохранении отклонения частоты первичная мощность значительно снижается, вплоть до нуля. Снижение мощности начинается, когда запас пара, который был в котле, израсходован, а котел не смог резко увеличить выработку пара, как по техническим, так и субъективным причинам.

3. «Котельная» – участие в ОПРЧ генерирующего оборудования ТЭС изменением нагрузки котла при слабой или отсутствующей реакции регулятора частоты вращения турбины на изменение частоты. Отсутствие реакции регулятора может быть связано с его большим износом или нечувствительностью к изменению частоты.

4. «Противоположная» – в отличие от «адекватной» повторяет по знаку изменение частоты. Это указывает на то, что блок управления регулятором частоты вращения турбины работает некорректно.

5. «Колебания» – после резкого изменения частоты возникают неза-

тухающие колебания активной мощности генерирующего оборудования относительно среднего значения с явно выраженными амплитудой и периодом колебаний, не связанных с колебаниями частоты. Это реакция характерная для той ситуации, когда на генераторах одной станции происходит сбой в работе блока управления регулятором частоты.

6. «Нет реакции» – зависимость изменения активной мощности генерирующего оборудования от изменения частоты отсутствует при наличии соответствующего резерва первичного регулирования.

### III. Разработка математической модели для исследования переходных процессов при ОПРЧ

Первый этап создания модели – реализация гидрогенератора, с математическим описанием его механической и электрической частей. В качестве объекта моделирования выбран гидроагрегат поскольку после реализации математической модели ее верификация будет происходить по опытным данным Усть-Хантайской ГЭС. К описанию механической части относятся функции моделирования работы гидротурбины и исполнительных механизмов. Для моделирования гидротурбины использована упрощенная передаточная функция (1), учитывающая жесткий гидравлический удар и связывающая мощность, и открытие направляющего аппарата.

$$W_{em}(p) = \frac{1 - u_0 T_w p}{0 + 0,5 \cdot u_0 T_w p}, \quad (1)$$

где  $u_0$  – начальное открытие направляющего аппарата в относительных единицах;  $T_w$  – постоянная времени водовода.

Передаточная функция может быть преобразована в вид дифференциального уравнения (2) и записана как:

$$\frac{dP_t}{dt} = \frac{2}{T_w} - 2 \frac{dS_{wg}}{dt} - \frac{2}{T_w} \frac{P_t}{S_{wg}}, \quad (2)$$

где  $S_{wg}$  представляет собой открытие направляющего аппарата.

В качестве приближенной модели исполнительных механизмов использовано апериодическое звено (3), что подтверждено опытными данными (осциллограммами Усть-Хантайской ГЭС):

$$W_{em}(p) = \frac{1}{1 + T_{em} p}. \quad (3)$$

Тогда дифференциальное уравнение (4), описывающее открытие



направляющего аппарата будет представлять собой:

$$\frac{dS_{wg}}{dt} = \frac{x - S_{wg}}{T_{sm}}, \quad (4)$$

где  $x$  – начальное открытие направляющего аппарата в относительных единицах;  $T_{sm}$  – постоянная времени сервомотора.

Следующим уравнением является уравнение движение ротора (5), описывающее электрическую часть гидроагрегата:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{in} + M_{syn} + M_{asyn}, \quad (5)$$

где  $J$  – момент инерции вращающихся частей,  $\omega$  – угловая частота вращения вала,  $M_{in}$  – внешний механический момент на валу синхронной машины,  $M_{syn}$  – синхронный электромагнитный момент,  $M_{asyn}$  – асинхронный электромагнитный момент.

Данный этап моделирования считается упрощенным, поэтому асинхронный момент принят равным нулю, момент турбины выражен через номинальную мощность агрегата, а синхронный момент в первом приближении принят равным мощности нагрузки. При этом мощность нагрузки представлена в виде суммы постоянной составляющей и составляющей, зависящей от частоты (учтен регулирующий эффект нагрузки). Потери на трение приняты равными 2 % от номинальной мощности машины. Тогда уравнение движение ротора (5) приобретает вид (6):

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{P}{\omega \cdot J} - \frac{P_{load}}{J} - K_{ml} \cdot \omega. \quad (6)$$

На данном этапе моделирования электрические и механические параметры второго агрегата принимаются равными параметрам первого.

Для вывода уравнений, описывающих процессы в цепи статора, составлена схема замещения (рис. 1). Две синхронные машины подключены к шинам, связанным с системой бесконечной мощности через сопротивление  $r_s + jx_s$ . К шинам также подключена нагрузка с постоянным сопротивлением  $r_l + jx_l$ . В качестве положительного направления токов машин ( $I_d$ ,  $I_q$ ) и системы ( $I_s$ ) принято направление к шинам, для тока нагрузки ( $I_l$ ) – от шин.

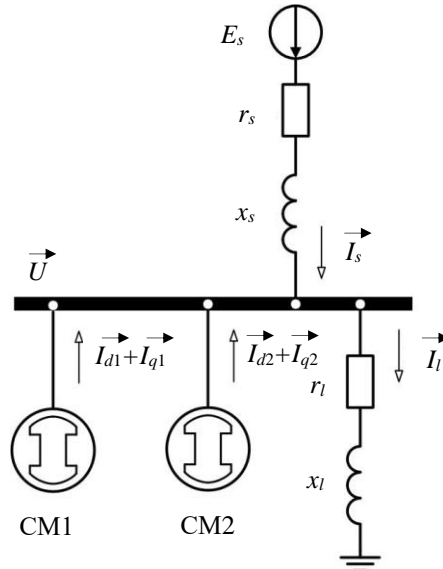


Рис. 1. Электрическая эквивалентная схема двух синхронных машин, подключенных к шинам

Fig. 1. Electrical equivalent circuit of two synchronous machines connected to busbars

Необходимо записать уравнения по 1-му и 2-му законам Кирхгофа для схемы (рис. 1) и системы (7), связывающих токи, напряжение и ЭДС синхронных машин:

$$\begin{cases} \vec{I}_l = \vec{I}_{d1} + \vec{I}_{q1} + \vec{I}_{d2} + \vec{I}_{q2} + \vec{I}_s; \\ \vec{U} = \vec{E}_s - \vec{I}_s Z_s; \\ \vec{U} = \vec{I}_l Z_l; \\ \vec{U} = \vec{E}_1 - \vec{I}_{d1}(r_{a1} + jx_{d1}) - \vec{I}_{q1}(r_{a1} + jx_{q1}); \\ \vec{U} = \vec{E}_2 - \vec{I}_{d2}(r_{a2} + jx_{d2}) - \vec{I}_{q2}(r_{a2} + jx_{q2}). \end{cases} \quad (7)$$

где  $E_s$  – фазная ЭДС системы,  $Z_s$  – комплексное сопротивление связи с системой,  $Z_l$  – комплексное сопротивление нагрузки,  $E_1$  – фазная ЭДС первой синхронной машины,  $E_2$  – фазная ЭДС второй синхронной машины,  $r_{a1}$  –

активное сопротивление обмотки статора первой машины,  $r_{a2}$  – активное сопротивление обмотки статора второй машины,  $x_{d1}, x_{q1}$  – индуктивные сопротивления обмотки статора по продольной и поперечной осям первой машины,  $x_{d2}, x_{q2}$  – индуктивные сопротивления обмотки статора по продольной и поперечной осям второй машины.

Далее будут представлены математические выкладки для получения уравнения, связывающего электрические параметры первого и второго синхронного генераторов.

Из первого, второго и третьего уравнений (7):

$$\begin{aligned} \vec{I}_s &= \frac{\vec{E}_s - (\vec{I}_{d1} + \vec{I}_{q1} + \vec{I}_{d2} + \vec{I}_{q2})Z_l}{Z_l + Z_s} = \\ &= \frac{\vec{E}_s}{Z_l + Z_s} - (\vec{I}_{d1} + \vec{I}_{q1} + \vec{I}_{d2} + \vec{I}_{q2}) \frac{Z_l}{Z_l + Z_s}. \end{aligned} \quad (8)$$

Из второго и четвертого уравнений (7) получим:

$$\vec{I}_{d1}(r_{a1} + jx_{d1} + Z_{ls}) + \vec{I}_{q1}(r_{a1} + jx_{q1} + Z_{ls}) + \vec{I}_{d2}Z_{ls} + \vec{I}_{q2}Z_{ls} = \vec{E}_1 - \vec{E}_s K_{ls}. \quad (9)$$

Аналогично из второго и пятого уравнений (7) получим:

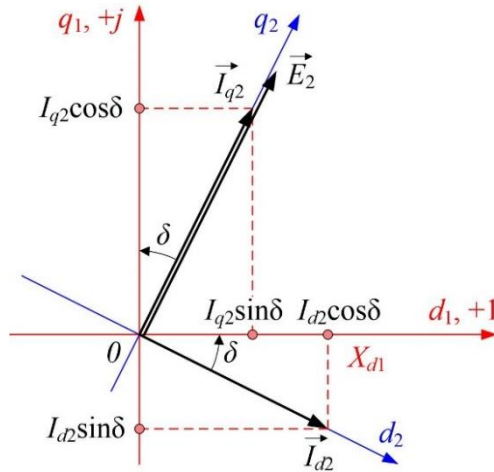
$$\vec{I}_{d2}(r_{a2} + jx_{d2} + Z_{ls}) + \vec{I}_{q2}(r_{a2} + jx_{q2} + Z_{ls}) + \vec{I}_{d1}Z_{ls} + \vec{I}_{q1}Z_{ls} = \vec{E}_2 - \vec{E}_s K_{ls}. \quad (10)$$

На рис. 2 представлена векторная диаграмма, поясняющая переход в систему  $dq$  координат.

$$\begin{cases} \vec{I}_{d1} = I_{d1}; \\ \vec{I}_{q1} = jI_{q1}; \\ \vec{E}_1 = jE_1; \\ \vec{I}_{d2} = I_{d2} \cos \delta - jI_{d2} \sin \delta = I_{d2} (\cos \delta - j \sin \delta); \\ \vec{I}_{q2} = I_{q2} \sin \delta + jI_{q2} \cos \delta = I_{q2} (\sin \delta + j \cos \delta); \\ \vec{E}_2 = E_2 \sin \delta + jE_2 \cos \delta = E_2 (\sin \delta + j \cos \delta); \\ \vec{E}_s = U_{nom} e^{j(90^\circ - \delta_{1s})}, \end{cases} \quad (11)$$

где  $\delta_{1s}$  – угол между ЭДС первой синхронной машины и ЭДС системы

( $\delta_{1s} = \alpha_1 - \alpha_s$ ).



**Рис. 2.** Переход в систему координат  $d/q$ :  
 $d_1$  – действительная ось;  $q_1$  – мнимая ось

**Fig. 2.** Transition to coordinate system  $d/q$ :  
 $d_1$  – real axis;  $q_1$  – imaginary axis

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
 \bar{E}_x &= \bar{E}_s K_{ls}, E_{xr} = \text{Re}(\bar{E}_x), E_{xi} = \text{Im}(\bar{E}_x); \\
 r_{ls} &= \text{Re}(Z_{ls}), x_{ls} = \text{Im}(Z_{ls}); \\
 r_{a1ls} &= r_{a1} + r_{ls}, x_{d1ls} = x_{d1} + x_{ls}, x_{q1ls} = x_{q1} + x_{ls}; \\
 z_{ls\delta11} &= r_{ls} \cos \delta + x_{ls} \sin \delta, z_{ls\delta12} = r_{ls} \sin \delta - x_{ls} \cos \delta; \\
 r_{a2ls} &= r_{a2} + r_{ls}, x_{d2ls} = x_{d2} + x_{ls}, x_{q2ls} = x_{q2} + x_{ls}; \\
 z_{ls\delta21} &= r_{a2ls} \cos \delta + x_{d2ls} \sin \delta, z_{ls\delta22} = r_{a2ls} \sin \delta - x_{q2ls} \cos \delta; \\
 z_{ls\delta23} &= r_{a2ls} \sin \delta - x_{d2ls} \cos \delta, z_{ls\delta24} = r_{a2ls} \cos \delta + x_{q2ls} \sin \delta.
 \end{aligned} \tag{12}$$

Тогда после ряда преобразований системы (11) с учетом (12) получим (13) для определения токов первой и второй синхронных машин:

$$\begin{cases} I_{d1} r_{a1ls} - I_{q1} x_{q1ls} + I_{d2} z_{ls\delta11} + I_{q2} z_{ls\delta12} = -E_{xr}; \\ I_{d1} x_{d1ls} + I_{q1} r_{a1ls} - I_{d2} z_{ls\delta12} + I_{q2} z_{ls\delta11} = E_1 - E_{xi}; \\ I_{d1} r_{ls} - I_{q1} x_{ls} + I_{d2} z_{ls\delta21} + I_{q2} z_{ls\delta22} = E_2 \sin \delta - E_{xr}; \\ I_{d1} x_{ls} + I_{q1} r_{ls} - I_{d2} z_{ls\delta23} + I_{q2} z_{ls\delta24} = E_2 \cos \delta - E_{xi}. \end{cases} \quad (13)$$

Система уравнений (13) в матричном виде будет выглядеть:

$$\begin{bmatrix} r_{a1ls} & -x_{q1ls} & z_{ls\delta11} & z_{ls\delta12} \\ x_{d1ls} & r_{a1ls} & -z_{ls\delta12} & z_{ls\delta11} \\ r_{ls} & -x_{ls} & z_{ls\delta21} & z_{ls\delta22} \\ x_{ls} & r_{ls} & -z_{ls\delta23} & z_{ls\delta24} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{d1} \\ I_{q1} \\ I_{d2} \\ I_{q2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -E_{xr} \\ E_1 - E_{xi} \\ E_2 \sin \delta - E_{xr} \\ E_2 \cos \delta - E_{xi} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Для нахождения ЭДС синхронных машин и решения матричного уравнения (14) дополнительно необходимо внести в модель уравнения для цепей возбуждения обеих СМ. Для описания процессов в цепи возбуждения использовано дифференциальное уравнение равновесия ЭДС и падений напряжения (15):

$$u_f = r_f i_f + L_{fd} \frac{di_f}{dt} + M_{fd} \frac{dI_d}{dt}, \quad (15)$$

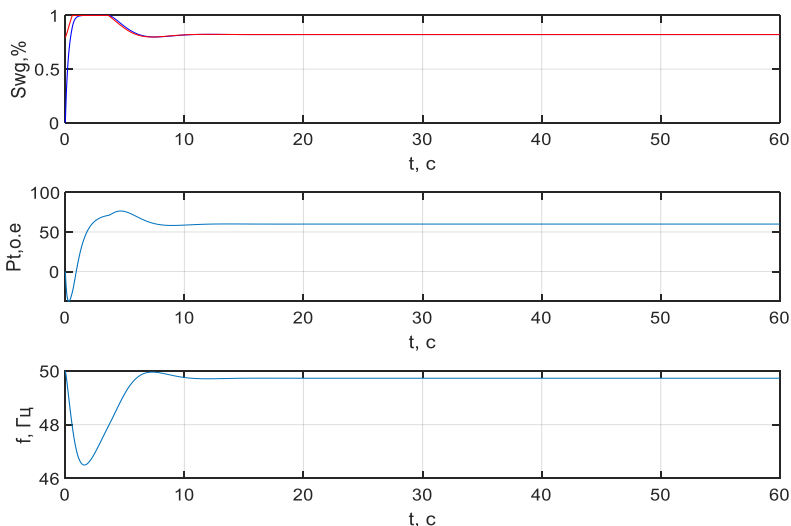
где  $u_f$  – напряжение на обмотке возбуждения,  $r_f$  – активное сопротивление обмотки возбуждения,  $i_f$  – ток возбуждения,  $L_{fd}$  – собственная индуктивность обмотки возбуждения с учетом насыщения,  $M_{fd}$  – взаимная индуктивность с учетом насыщения обмотки возбуждения и обмотки статора (продольного контура).

#### IV. Результаты

Уравнения (2), (4), (6) представляют собой систему дифференциальных уравнений, решение которых получено с помощью решателя *ODE 45* в среде *MATLAB* на промежутке от 0 до 60 с с шагом в 0,01 с, и представлено на рис. 3.

Согласно рис. 3, функционирование математической модели является корректным. При увеличении открытия направляющего аппарата (в %) увеличивается и выдаваемая агрегатом активная мощность (в о.е.).

Поскольку данный этап моделирования принят упрощенным, то на начало процесса имеется открытие направляющего аппарата, соответствующее холостому ходу (около 30 %).



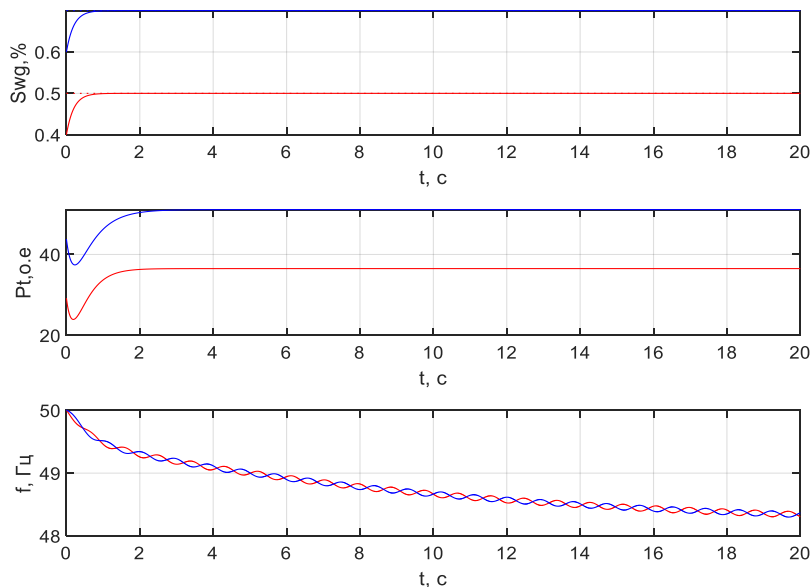
**Рис. 3. Результат функционирования математической модели, содержащей одну синхронную машину**

**Fig. 3. The result of the functioning of a mathematical model containing one synchronous machine**

Далее для оценки переходных процессов при осуществлении ОПРЧ необходимо смоделировать двухмашинную энергосистему, т.е. расширить имеющуюся математическую модель в части следующих пунктов:

- 1) добавить уравнения функционирования гидротурбины и исполнительных механизмов для второго гидроагрегата;
- 2) добавить уравнения, описывающие электрическую часть обоих гидроагрегатов, для формирования связи между ними при осуществлении ОПРЧ. К данным уравнениям относятся уравнения токов и напряжений на шинах генераторов.

Решение (14) позволяет сформировать электрическую связь между синхронными машинами и найти токи по ортогональным составляющим в обмотках статора. Полученная математическая модель отражает взаимодействие двух синхронных машин (рис. 4). При этом частота не регулируется посредством автоматических устройств, а возникающее ее изменение связано с электрической связью генерирующего оборудования.



**Рис. 4. Результат функционирования математической модели, Содержащей две синхронные машины**

**Fig. 4. The result of the functioning of a mathematical model containing two synchronous machines**

## V. Заключение

На основе анализа работ ученых и нормативной документации дано исчерпывающее описание и подтверждение проблемы исследования, связанной с возникновением незатухающих колебаний частоты при ОПРЧ.

Одной из основных причин возникновения незатухающих колебаний являются неточная настройка автоматических регуляторов на конкретном генерирующем оборудовании и несовершенство законов регулирования, определяющих статизм регулирования. Данная проблема подтверждена работами представителей системного оператора России и многочисленными статьями ученых из Китая и Канады, которые изучали незатухающие колебания частоты в энергосистемах с большим содержанием гидрогенерации.

Основной задачей статьи являлся анализ переходных процессов, возникающих при ОПРЧ, связанный с описанием разработки математической модели энергосистемы. Модель состоит из двух синхронных гидроагрегатов, имеющих свои механические характеристики и связанные между собой

электрически. Математическая модель построена, опираясь на положения ТАР и методы решения дифференциальных уравнений.

Результатом функционирования модели на данном этапе является графическая визуализация изменения активной мощности и открытия направляющего аппарата каждого из агрегатов, а также изменения частоты энергосистемы и возникающие при этом колебания. В дальнейшем математическая модель будет расширена и дополнена двумя регуляторами частоты для каждого из генераторов, что позволит более детально исследовать и анализировать переходные процессы при ОПРЧ, а также выдвигать тезисы по формированию модернизированных методов первичного регулирования частоты в энергосистемах.

© Фёдорова В.А., 2023

© Кириченко В.Ф., 2023

© Глазырин Г.В., 2023

*Поступила в редакцию 16.05.2023*

*Принята к публикации 02.06.2023*

*Received 16.05.2023*

*Accepted 02.06.2023*

### Библиографический список

- [1] Барзам А.Б. Системная автоматика. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 446 с.
- [2] Павлов Г.М., Меркурьев Г.В. Автоматика энергосистем. С.-Пб.: Центр подготовки кадров энергетики, 2001 г. – 381 с.
- [3] Овчаренко Н.И. Автоматика энергосистем. М.: МЭИ, 2016. – 476 с.
- [4] Fyodorova V.A., Kirichenko V.F., Glazyrin G.V., Arestova A.Y. Improving Generators Synchronization Methods Based on the Multifunctional System Implementation // 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Nov. 11-13, 2022, Yekaterinburg, Russia: IEEE, 2022. P. 2100-2105. DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016916
- [5] Fyodorova V.A., Kirichenko V.F., Rusina A.G., Glazyrin G.V. Application of Automatic Device for Generator Connection to the Network by Method of Accelerated Synchronization // 2022 IEEE 23-rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Jun. 30 – Jul. 04, 2022, Altai, Russia: IEEE, 2022. P. 461-466. DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855129
- [6] Касьянов С.Е., Гуриков О.В. Особенности первичного регулирования частоты в энергосистеме с обратной связью по активной мощности // Электроэнергетика глазами молодежи-2018, Октябрь 01-05, 2018, Казань, Россия: КГЭУ, 2018. С. 282-285.
- [7] Гуриков О.В., Смирнов А.Н., Андрианов Д.И. Корректировка алгоритмов автоматических регуляторов скорости турбогенераторов для обеспечения устойчивой работы энергосистемы // Электроэнергетика глазами молодежи-2018, Октябрь 01-05, 2018, Казань, Россия: КГЭУ, 2018. С. 257-260.



- [8] Xu Y., Bai W. Research on suppression of ultra-low frequency oscillation of high hydropower proportion system by DC frequency limiter controller // 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), Oct. 21-24, 2019, Xi'an, China: IEEE, 2019. P. 1780-1783. DOI: 10.1109/APAP47170.2019.9224760
- [9] Shen Y., Wang J., Zhou P., Yang H., Gu W., Yin M. Characteristic analysis of primary frequency modulation in power system under different types of active disturbance // 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Oct. 20-22, 2018, Beijing, China: IEEE, 2018. P. 1-5. DOI: 10.1109/EI2.2018.8582188
- [10] Gao J., Zhang M-L., Wang Y-H., Shang W-Y., Song K., Han Z-T., Qin L., Ruan X. Frequency stability analysis and control of AC/DC system // 2019 16th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing, Dec. 14-15, 2019, Chengdu, China: IEEE, 2019. P. 392-399. DOI: 10.1109/ICCWAMTIP47768.2019.9067566
- [11] Liu Q., Chen G., Liu B., Zhang Y., Liu C., Zeng Z, Fan C., Han X. Emergency control strategy of ultra-low frequency oscillations based on WAMS // 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), May 21-24, 2019, Chengdu, China: IEEE, 2019. P. 296-301. DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881141
- [12] Li W., Gole A.M., Kaffashan I., Xiao X. UHVDC islanded operation system ultralow-frequency oscillation and its countermeasures // IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. 2021. № 44 (2). P. 110-117. DOI: 10.1109/ICJECE.2020.2994766
- [13] Rimorov D., Heniche A, Kamwa I., Stefopoulos G., Babaei S., Fardanesh B. Inter-area oscillation damping and primary frequency control of the New York state power grid with multi-functional multi-band power system stabilizers // 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Jul. 17-21, 2016, Boston, MA, USA: IEEE, 2016. P. 1-5. DOI: 10.1109/PESGM.2016.7943312
- [14] Delavari A., Kamwa I. Sparse and resilient hierarchical direct load control for primary frequency response improvement and inter-area oscillations damping // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. № 33 (5). P. 5309-5318. DOI: 10.1109/TPWRS.2018.2795462
- [15] ГОСТ 55890-2013. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Регулирование частоты и потоков активной мощности. Нормы и требования. Введ. 2014-09-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 18 с.
- [16] Trinh N.T., Zeller M., Erlich I. Coordination of functional controllers in a multiterminal MMC-VSC-HVDC system control // 2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), Oct. 21-25, 2018, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina: IEEE, 2018. P. 1-5. DOI: 10.1109/ISGTEurope.2018.8571582

## References

- [1] A.B. Barzam, *Sistemnaya avtomatika [System automation]*. Moscow: Energoatomizdat, 1989 (in Russian).
- [2] G.M. Pavlov and G.V. Merkur'ev, *Avtomatika Energosistem [Power Systems Automation]*. St. Petersburg: Center for training personnel in the energy sector, 2001 (in Russian).
- [3] N.I. Ovcharenko, *Avtomatika energosistem [Power systems automation]*. Moscow: MPEI Publishing House, 2016 (in Russian).
- [4] V.A. Fyodorova, V.F. Kirichenko, G.V. Glazyrin and A.Y. Arestova, "Improving generators synchronization methods based on the multifunctional system implementation", in proc. *2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, Nov. 11-13, 2022, Yekaterinburg, Russia, pp. 2100-2105. DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016916
- [5] V.A. Fyodorova, V.F. Kirichenko, A.G. Rusina and G.V. Glazyrin, "Application of automatic device for generator connection to the network by method of accelerated synchronization", in proc. *2022 IEEE 23-rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, Jun. 30 – Jul. 04, 2022, Altai, Russia, pp. 461-466. DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855129
- [6] S.E. Kas'yanov and O.V. Gurikov, "Osobennosti pervichnogo regulirovaniya chastoty v energosisteme s obratnoy svyaz'yu po aktivnoy moshchnosti [Features of primary frequency control in power system with active power feedback]", in proc. *Elektroenergetika glazami molodezhi-2018 [Power industry through the eyes of youth-2018]*, Oct. 01-05, 2018, Kazan, Russia, pp. 282-285 (in Russian).
- [7] O.V. Gurikov, A.N. Smirnov and D.I. Andrianov, "Korrektirovka algoritmov avtomaticheskikh regulyatorov skorosti turbogeneratorov dlya obespecheniya ustojchivoj raboty energosistemy [Correction of algorithms for automatic speed controllers of turbogenerators to ensure stable operation of the power system]", in proc. *Elektroenergetika glazami molodezhi-2018 [Power industry through the eyes of youth-2018]*, Oct. 01-05, 2018, Kazan, Russia, pp. 257-260 (in Russian).
- [8] Y. Xu and W. Bai, "Research on suppression of ultra-low frequency oscillation of high hydropower proportion system by DC frequency limiter controller", in proc. *2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP)*, Oct. 21-24, 2019, Kazan, Russia, pp. 1780-1783. DOI: 10.1109/APAP47170.2019.9224760
- [9] Y. Shen, J. Wang, P. Zhou, H. Yang, W. Gu and M. Yin, "Characteristic analysis of primary frequency modulation in power system under different types of active disturbance", in proc. *2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Oct. 20-22, 2018, Beijing, China, pp. 1-5. DOI: 10.1109/EI2.2018.8582188
- [10] J. Gao, M-L. Zhang, Y-H. Wang, W-Y. Shang, K. Song, Z-T. Han, L. Qin and X. Ruan, "Frequency stability analysis and control of AC/DC system", in proc. *2019 16th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing*, Dec. 14-15, 2019, Chengdu, China, pp. 392-399. DOI: 10.1109/ICCWAMTIP47768.2019.9067566
- [11] Q. Liu, G. Chen, B. Liu, Y. Zhang, C. Liu, Z. Zeng, C. Fan and X. Han, "Emergency control strategy of ultra-low frequency oscillations based on WAMS", *2019 IEEE*

- Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia)*, May 21-24, 2019, Chengdu, China, pp. 296-301. DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881141
- [12] W. Li, A.M. Gole, I. Kaffashan and X. Xiao, "UHVDC islanded operation system ultralow-frequency oscillation and its countermeasures", *IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 44, no. 2, pp. 110-117, Mar. 2021. DOI: 10.1109/ICJECE.2020.2994766
- [13] D. Rimorov, A. Heniche, I. Kamwa, G. Stefopoulos, S. Babaei and B. Fardanesh, "Inter-area oscillation damping and primary frequency control of the New York state power grid with multi-functional multi-band power system stabilizers", in proc. *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, Jul. 17-21, 2016, Boston, MA, USA, pp. 1-5. DOI: 10.1109/PESGM.2016.7943312
- [14] A. Delavari and I. Kamwa, "Sparse and resilient hierarchical direct load control for primary frequency response improvement and inter-area oscillations damping", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 5, pp. 5309-5318, Sep. 2018. DOI: 10.1109/TPWRS.2018.2795462
- [15] United power system and isolated power systems. Operative-dispatch management. Frequency control and control of active power. Norms and requirements, GOST 55890-2013, Sept. 2014.
- [16] N.T. Trinh, M. Zeller and I. Erlich, "Coordination of functional controllers in a multiterminal MMC-VSC-HVDC system control", in proc. *2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, Oct. 21-25, 2018, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ISGTEurope.2018.8571582

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Фёдорова Виктория Александровна**, аспирант, младший научный сотрудник Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Российская Федерация.

**Viktoriya A. Fyodorova**, graduate student, junior researcher of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation.

**Кириченко Виктор Фёдорович**, аспирант Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Российская Федерация.

**Viktor F. Kirichenko**, graduate student of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation.

**Глазырин Глеб Владимирович**, кандидат технических наук, доцент Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Российская Федерация.

**Gleb V. Glazyrin**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation.

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ГЛАВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

**А.С. Серебряков**

ORCID: 0000-0002-7455-2348 e-mail: a.sereb@mail.ru

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет  
*Княгинино, Россия*

**Д.А. Семенов**

ORCID: 0000-0002-9228-6864 e-mail: xxxmy@mail.ru

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет  
*Княгинино, Россия*

**Е.А. Сбитнев**

ORCID: 0000-0002-7114-6934 e-mail: evgenij.sbitnev@yandex.ru

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет  
*Княгинино, Россия*

**А.В. Сидорова**

ORCID: 0000-0003-3135-1914 e-mail: smanya11.05@mail.ru

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет  
*Княгинино, Россия*

Описывается один из методов диагностики главной изоляции масляных трансформаторов, позволяющий оценить его остаточный ресурс. Техническая эксплуатация трансформаторов показала, что, кроме ресурса изоляции, необходимо знать причины его снижения. Представлены результаты испытаний двух различных по назначению и конструкции трансформаторов в трех этапах – без бака и масла; без масла с баком; в баке с залитым маслом. По результатам этих испытаний выявлено, что быстрая экспонента характеризует старение трансформаторного масла. Исходя из этого, можно своевременно предотвратить отказ трансформатора либо вывод его в ремонт.

**Ключевые слова:** быстрая экспонента, возвратное напряжение, диагностика, напряжение саморазряда, остаточный ресурс, трансформаторы.

**Для цитирования:** Серебряков А.С., Семенов Д.А., Сбитнев Е.А., Сидорова А.В. Техническая диагностика главной изоляции силовых трансформаторов. Определение остаточного ресурса // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 4. С. 108-122. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_108

## **TECHNICAL DIAGNOSTICS OF POWER TRANSFORMERS MAIN INSULATION. DETERMINATION OF REMAINING RESOURCE**

**A.S. Serebryakov**

ORCID: **0000-0002-7455-2348** e-mail: **a.sereb@mail.ru**  
Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics  
*Knyaginino, Russia*

**D.A. Semenov**

ORCID: **0000-0002-9228-6864** e-mail: **xxxmy@mail.ru**  
Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics  
*Knyaginino, Russia*

**E.A. Sbitnev**

ORCID: **0000-0002-7114-6934** e-mail: **evgenij.sbitnev@yandex.ru**  
Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics  
*Knyaginino, Russia*

**A.V. Sidorova**

ORCID: **0000-0003-3135-1914** e-mail: **smany11.05@mail.ru**  
Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics  
*Knyaginino, Russia*

**Abstract.** The paper describes one of the methods of diagnostics of the main insulation of oil transformers, which allows to estimate its residual life. Technical operation of transformers has shown that in addition to the insulation resource, it is necessary to know the reasons for its decline. The results of tests of two transformers of different purpose and design in three stages are presented – without a tank and oil; without oil with a tank; in a tank with filled oil. According to the results of the analysis of these tests, it was revealed that a fast exponent characterizes the aging of transformer oil. It is possible to prevent the failure of the transformer in a timely manner or its withdrawal for repair based on these results.

**Key words:** diagnostics, fast exponent, return voltage, residual life, self-discharge voltage, transformers.

**For citation:** A.S. Serebryakov, D.A. Semenov, E.A. Sbitnev and A.V. Sidorova. “Technical diagnostics of power transformers main insulation. Determination of remaining resource”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 108-122, 2023.

DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_108

## 1. Введение

Совершенствование методов оценки технического состояния силовых трансформаторов остается одной из актуальных задач [1]. Техническую диагностику силовых маслонаполненных трансформаторов могут представлять модели, позволяющие идентифицировать бездефектное состояние по ряду различных диагностических параметров, среди которых:

- параметры схемы замещения (по изменению активного сопротивления обмоток судят о целостности электрических цепей и состояния контактных соединений) [2];
- однородная статистика многолетних наблюдений за характеристиками бумаги и масла [3];
- периодический хроматографический анализ растворенных в масле газов (ХАРГ) [4];
- модель двухэтапного алгоритма выявления характера прогнозируемого дефекта и оценка технического состояния маслонаполненного силового трансформатора в условиях нечеткости, неопределенности и неполноты об объекте диагностики [5];
- высоковольтные испытания изоляции [6];
- физико-химический анализ жидкого диэлектрика [7].

Все модели имеют свои преимущества и недостатки.

Техническое состояние силовых трансформаторов и остаточный ресурс их работы наиболее объективно можно определить, измеряя такие диагностические параметры, как напряжение саморазряда и возвратное напряжение [8]. С этой целью авторами были проведены испытания разных трансформаторов при помощи устройства для диагностики электрической изоляции УДЭИ-1 [9]. Это устройство служит для диагностики главной изоляции трансформаторов, тяговых электродвигателей и кабелей с пропитанной бумажной изоляцией (ПБИ). По результатам измерения определяется остаточный ресурс испытываемых объектов.

## II. Цели и задачи исследования

Прибор УДЭИ-1 включает в себя регулируемый высоковольтный источник питания от 500 до 2500 В, высоковольтные реле, датчик тока и датчик напряжения, который управляется ноутбуком с помощью разработанного авторами программного обеспечения.

В [9] показано, как с помощью УДЭИ-1 снимаются диагностические параметры высоковольтной изоляции – напряжение саморазряда  $U_c$  и возвратное напряжение  $U_v$ , по которым определяется остаточный ресурс изоляции трансформаторов. С целью углубления исследований и выявления возможной причины снижения ресурса нами было проведено исследование кривых напряжения саморазряда  $U_c$  и возвратного напряжения  $U_v$ , при ис-

питании разных трансформаторов: масляного распределительного герметизированного трансформатора ТМГ-100/35/0,4, после капитального ремонта и нового печного трансформатора ЭТЦПК 7500/10-У2.

### III. Материалы и методы

Испытания первого трансформатора ТМГ-100/35/0,4 проводились при подаче высокого напряжения 2500 В на сторону ВН при заземленной НН в три этапа: 1 – без бака и масла; 2 – без масла с баком; 3 – в баке с залитым маслом. В результате испытаний были получены реальные зависимости  $U_c$  и  $U_B$  первого трансформатора (рис. 1).

Остаточный ресурс  $\tau_c$  изоляции по напряжению саморазряда для трансформатора ТМГ-100/35/0,4 рассчитывался по формуле [9]:

$$\tau_c = \frac{u_{c15}}{30}, \quad (1)$$

где  $u_{c15}$  – значение напряжения саморазряда, измеренное на 15-й секунде; 30 В – уменьшение напряжения саморазряда, измеренное на 15-й секунде.

Остаточный ресурс в годах для режимов 1, 2 и 3 (рис. 1, а) при изменении напряжения саморазряда будет равен:

$$\tau_{c.1} = \frac{490}{30} = 16,3; \quad \tau_{c.2} = \frac{625}{30} = 20,8; \quad \tau_{c.3} = \frac{850}{30} = 28,3.$$

Ресурс по возвратному напряжению рассчитывался по формуле:

$$\tau_B = \frac{u_{B, \max} \cdot t_{\max}}{200}, \quad (2)$$

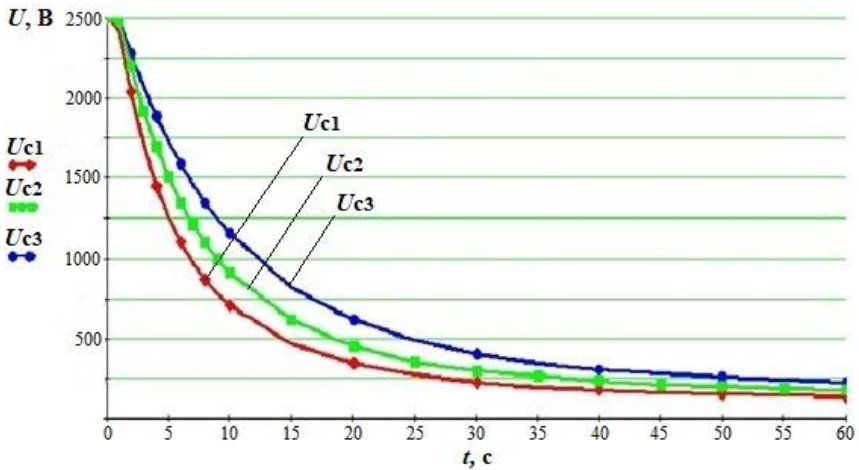
где  $u_{B, \max} \cdot t_{\max}$  – произведение максимального возвратного напряжения  $u_{B, \max}$  на время  $t_{\max}$  возникновения этого максимума.

Остаточный ресурс в годах для режимов 1, 2 и 3 (рис. 1, б) по возвратному напряжению будет равен:

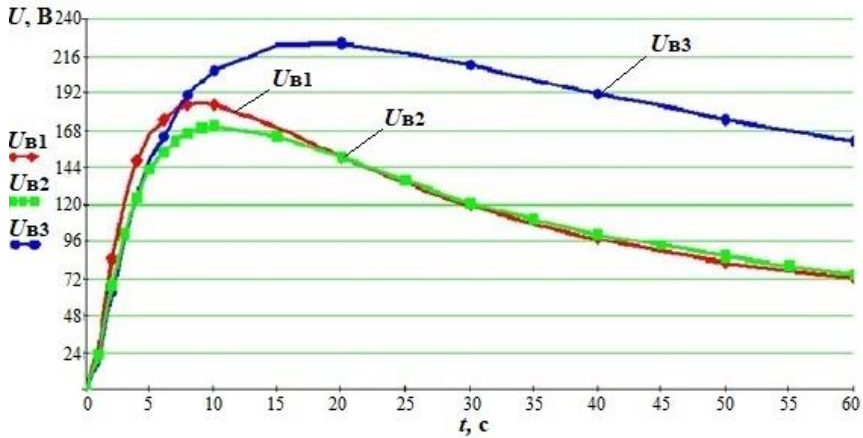
$$\tau_{B1} = \frac{186 \cdot 9}{200} = 8,37; \quad \tau_{B2} = \frac{174 \cdot 10}{200} = 8,7; \quad \tau_{B3} = \frac{226 \cdot 20}{200} = 22,6.$$

Ожидаемый ресурс рассчитывался по формуле:

$$\tau = \sqrt{\tau_{C3} \cdot \tau_{B3}} = \sqrt{28,3 \cdot 22,6} = 25,3.$$



(a)



(б)

Рис. 1. Результаты измерений трансформатора ТМГ-100/35/0,4: кривые напряжения саморазряда в трех режимах испытания (а); кривые возвратного напряжения в трех режимах испытания (б)

Fig. 1. Measurement results of the transformer TMG-100/35/0.4: self-discharge voltage curves in three test modes (a); return voltage curves in three test modes (b)



Аналогичным образом был испытан второй трансформатор ЭТЦПК 7500/10-У2.

Печной трансформатора ЭТЦПК 7500/10-У2 является специальным трансформатором. Он предназначен для обеспечения стабильного и надежного питания дуговых сталеплавильных электропечей промышленного назначения.

Трансформатор допускает эксплуатацию в течение длительного времени при максимальной нагрузке. Система охлаждения с принудительной циркуляцией воды и масла обеспечивает эффективное рассеивание тепла. Изменение уровня напряжения возможно дистанционным путем. Число положений переключателя – 12. Ввиду указанных особенностей конструкции электропечного трансформатора несколько отличаются и его диагностические параметры.

Испытания проводились при подаче высокого напряжения на сторону ВН, при заземленной стороне НН в следующие три этапа: 1 – без бака и масла до просушки изоляции после сборки; 2 – без бака и масла после просушки; 3 – в баке с маслом. В результате были получены реальные зависимости  $U_c$  и  $U_b$  второго трансформатора при разных этапах испытаний, показанные на рис. 2, а и б соответственно.

Остаточный ресурс  $\tau_c$  изоляции по напряжению саморазряда для трансформатора ЭТЦПК 7500/10-У2, как показали проведенные исследования, следует рассчитывать по формуле [9]:

$$\tau_c = \frac{u_{c15}}{50}, \quad (3)$$

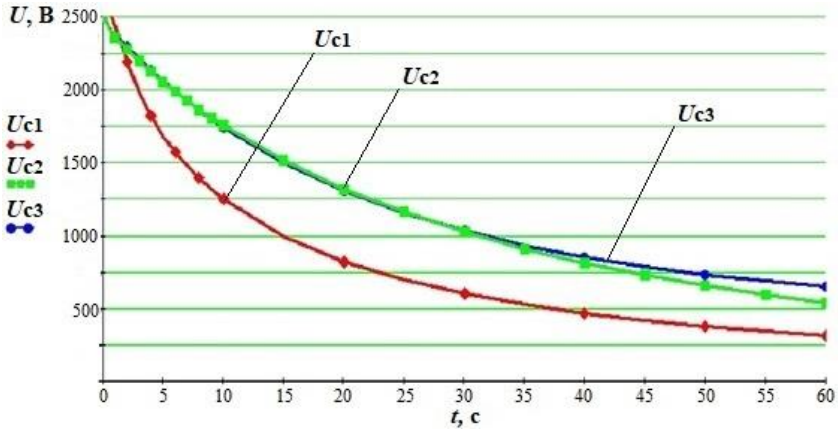
где  $u_{c15}$  – величина напряжения саморазряда, измеренная на 15 секунде; 50 В – уменьшение напряжения саморазряда на 15-й секунде за один год.

Остаточный ресурс в годах для режимов 1, 2 и 3 (рис. 2, а) при изменении напряжения будет равен:

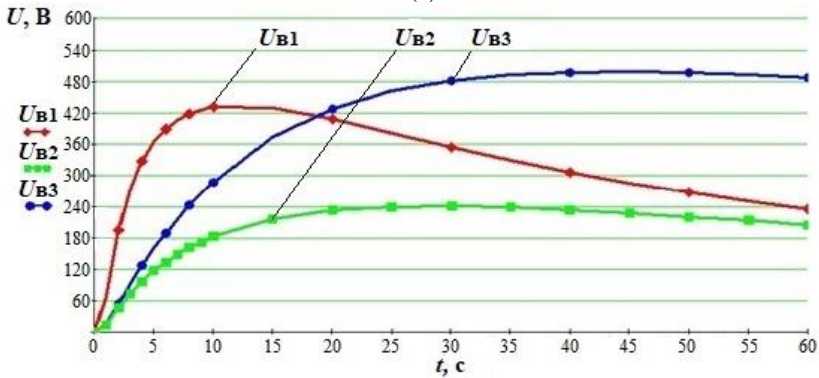
$$\tau_{c.1} = \frac{1000}{50} = 20; \quad \tau_{c.2} = \frac{1500}{50} = 30; \quad \tau_{c.3} = \frac{1500}{50} = 30.$$

Ресурс по возвратному напряжению следует рассчитывать по формуле:

$$\tau_b = \frac{u_{b, \max} \cdot t_{\max}}{660}. \quad (4)$$



(a)



(б)

Рис. 2. Результаты измерений трансформатора ЭТЦПК 7500/10-У2: кривые напряжения саморазряда в трех режимах испытания (а); кривые возвратного напряжения в трех режимах испытания (б)

Fig. 2. Measurement results of the ETCPC 7500/10-U2 transformer: self-discharge voltage curves in three test modes (a); return voltage curves in three test modes (b)

Остаточный ресурс в годах для режимов 1, 2 и 3 (рис. 2, б) по возвратному напряжению будет равен:

$$\tau_{B1} = \frac{430 \cdot 10}{660} = 6,5; \tau_{B2} = \frac{240 \cdot 30}{660} = 10,9; \tau_{B3} = \frac{500 \cdot 40}{660} = 30,3.$$

Ожидаемый ресурс рассчитывался по формуле:

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{с.з}} \cdot \tau_{\text{вз}}} = \sqrt{30 \cdot 30,3} = 30,1.$$

Приведенные формулы позволяют определить остаточный ресурс главной изоляции трансформатора. Значения остаточного ресурса, определенные по напряжению саморазряда и по возвратному напряжению для трансформаторов с маслом, практически совпадают.

Как показал опыт эксплуатации, не всегда бывает достаточно знать только остаточный ресурс главной изоляции трансформаторов. Необходимо знать и причину снижения ресурса для ее устранения [10]. Дальнейшие исследования заключались в том, чтобы разложить кривые саморазряда на составляющие, как это показано в [9].

По ранее проведенным исследованиям [9] было установлено, что главная изоляция трансформатора может быть представлена трехслойной моделью. Соответственно, кривая саморазряда в этом случае описывается тремя составляющими экспонентами – медленной, средней и быстрой. Исходя из этого, можно предположить, что каждая экспонента соответствует определенному слою изоляции трансформатора [9], а именно маслу, трансформаторной бумаге и компаундам.

По результатам разложения кривой саморазряда на экспоненциальные составляющие можно провести более глубокую диагностику изоляции.

Напряжение саморазряда будет равно сумме напряжений на отдельных слоях изоляции, т.е. будет равно сумме трех экспонент – медленной, средней и быстрой:

$$U_c = U_{01} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + U_{02} e^{-\frac{t}{\tau_2}} + U_{03} e^{-\frac{t}{\tau_3}}, \quad (5)$$

где  $\tau_1 = R_1 C_1$ ,  $\tau_2 = R_2 C_2$ ,  $\tau_3 = R_3 C_3$  – постоянные времени саморазряда слоев изоляции, т.е. постоянные времени экспонент – медленной, средней и быстрой;  $U_{01}$ ,  $U_{02}$ ,  $U_{03}$  – напряжения на слоях в начальный момент времени саморазряда.

Кривые напряжения саморазряда  $U_c$  первого трансформатора, показанные на рис. 1, при подаче испытательного напряжения 2500 В аппроксимируются суммой следующих экспонент (рис. 3):

– при 1 этапе испытания без бака и масла (рис. 3, а):

$$U_c = 252 \cdot e^{-\frac{t}{95,6}} + 1358 \cdot e^{-\frac{t}{8,3}} + 812 \cdot e^{-\frac{t}{2,8}}.$$

– при 2 этапе без масла с баком (рис. 3, б):

$$U_c = 336 \cdot e^{-\frac{t}{94}} + 1827 \cdot e^{-\frac{t}{8,2}} + 322 \cdot e^{-\frac{t}{2,4}}.$$

– при 3 этапе в баке с залитым маслом (рис. 3, в):

$$U_c = 554 \cdot e^{-\frac{t}{67}} + 1946 \cdot e^{-\frac{t}{8,4}}.$$

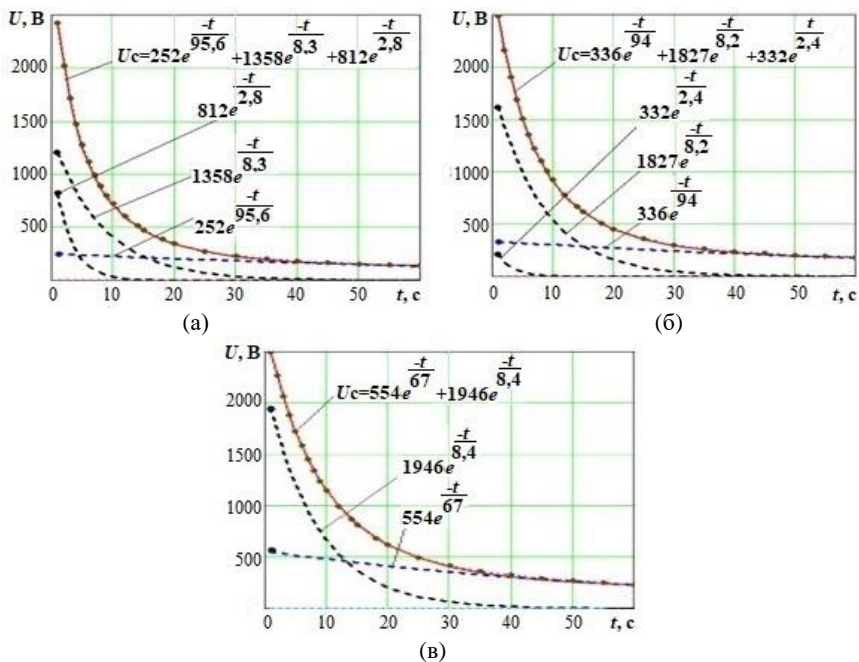


Рис. 3. Кривые напряжения саморазряда  $U_c$  трансформатора ТМГ-100/35/0,4: при 1 этапе испытания без бака и масла (а); при 2 этапе без масла с баком (б); при 3 этапе в баке с залитым маслом (в)

Fig. 3. Self-discharge voltage curves of the  $U_c$  transformer TMG-100/35/0.4: at the 1st stage of the test without a tank and oil (a); at the 2nd stage without oil with a tank (b); at the 3rd stage in a tank filled with oil (v)

В результате аппроксимации кривой напряжения саморазряда  $U_c$  второго трансформатора, показанной на рис. 2, были получены суммы следующих экспонент (рис. 4):

– при 1 этапе испытания без бака и масла до просушки изоляции после сборки (рис. 4, а):

$$U_c = 830 \cdot e^{-\frac{t}{59,9}} + 1195 \cdot e^{-\frac{t}{11,9}} + 728 \cdot e^{-\frac{t}{3,1}}.$$

– при 2 этапе без бака и масла после просушки (рис. 4, б):

$$U_c = 1443 \cdot e^{-\frac{t}{57,9}} + 931 \cdot e^{-\frac{t}{17,2}} + 63,2 \cdot e^{-\frac{t}{7,5}}.$$

– при 3 этапе в баке с маслом (рис. 4, в):

$$U_c = 874,6 \cdot e^{-\frac{t}{151,2}} + 1581 \cdot e^{-\frac{t}{18,5}}.$$

Экспериментальные исследования показали, что, несмотря на разницу в конструкции двух трансформаторов, в напряжении саморазряда появляется общая закономерность. Она заключается в том, что кривые напряжения саморазряда содержат три ярко выраженные экспоненты: быструю с постоянной времени  $\tau_1 = 0,5 \div 8$  с; среднюю с постоянной времени  $\tau_2 = 8 \div 20$  с и медленную с постоянной времени  $\tau_3 = 5,5 \div 155$  с.

На рис. 3 и 4 видно, что быстрая экспонента присутствует, когда нет масла, а после заливки масла она исчезает – это говорит об влиянии масла на эту экспоненту. Можно сделать вывод, что при увеличении быстрой экспоненты ухудшаются свойства масла, и значит, для повышения остаточного ресурса достаточно провести регенерацию или замену масла. Если в процессе эксплуатации происходит уменьшение средней и медленной экспоненты, это говорит о разрушении изоляции обмотки и барьера между обмотками.

По проведенным исследованиям видно, что напряжение саморазряда у трансформатора без бака и масла до просушки ниже, чем после просушки и при наличии масла. На рисунках хорошо отражено, как параметр напряжение саморазряда увеличивается после просушки и после заливки масла.

#### IV. Результаты

Проведенный анализ показал (рис. 5), как влияет изменение состояния изоляции на быструю экспоненту. Следовательно, по ее величине можно судить о состоянии масла в баке трансформатора, т.е. нужно знать быструю экспоненту. Нужны приборы, которые позволяют это сделать, например, прибор УДЭИ-1.

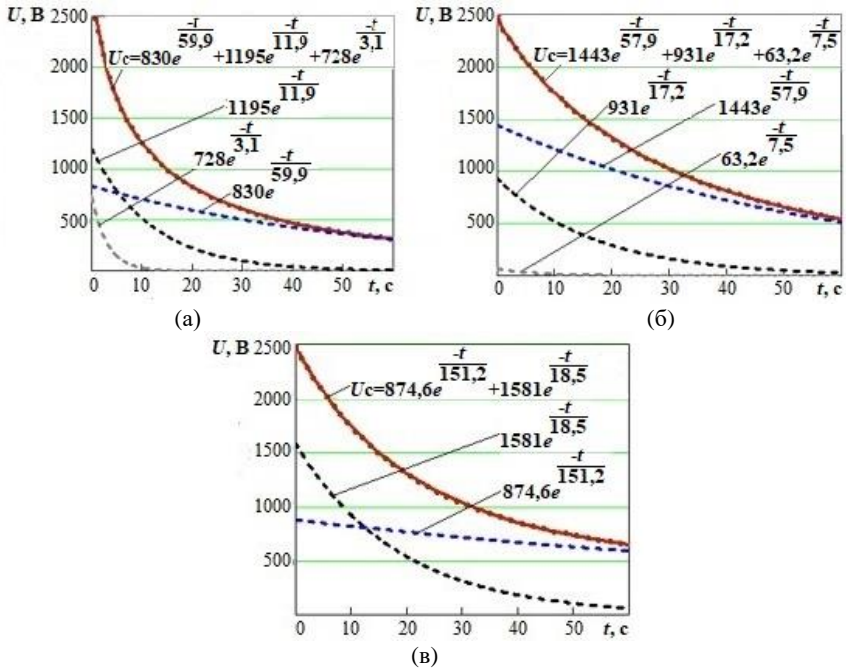


Рис. 4. Кривые напряжения саморазряда  $U_c$  трансформатора ЭТЦПК 7500/10-U2: без бака и масла до просушки изоляции после сборки (а); без бака и масла после просушки (б); в баке с маслом (в)

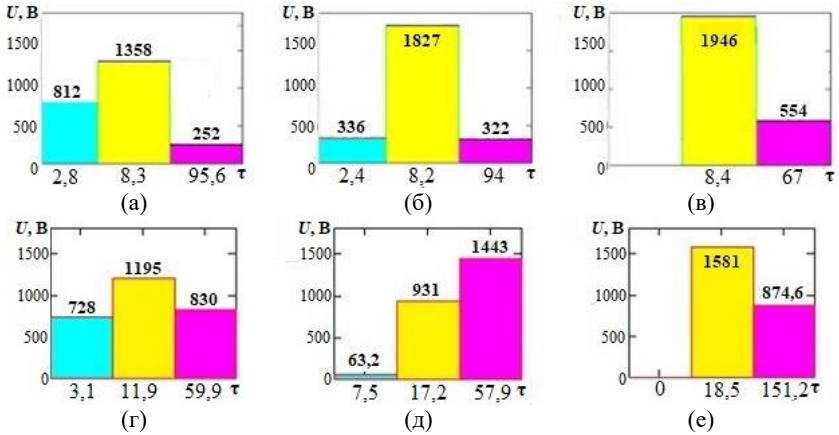
Fig. 4. Self-discharge voltage curves of the  $U_c$  transformer ETСPC 7500/10-U2: without tank and oil before drying the insulation after assembly (a); without tank and oil after drying (b); in a tank with oil (v)

## V. Заключение

1. Быстрая экспонента характеризует старение трансформаторного масла. Соответственно, возникает необходимость разложения полученных кривых напряжения саморазряда на составляющие экспоненты, дающие новую информацию о состоянии слоев изоляции. Большинство существующих приборов не дает возможность измерения быстрой экспоненты, поскольку она быстро затухает.

2. По возвратному напряжению видно, что диагностический параметр произведение максимального возвратного напряжения на время возникновения этого максимума ( $U_{\text{Вмакс}} \cdot t_{\text{макс}}$ ) всех ниже, а после просушки этот параметр увеличивается, также это произведение увеличивается в разы

после заливки масла, что снова говорит о влиянии масла на данный параметр, соответственно по произведению максимального значения возвратного напряжения и времени возникновения этого максимума можно судить не только об остаточном ресурсе но и о качестве масла.



**Рис. 5. Гистограммы распределения напряжений на слоях изоляции для двух трансформаторов: распределительного трансформатора ТМГ-100/10/0,4 – без бака и масла (а); без масла с баком (б); в баке с залитым маслом (в); электропечного трансформатора ЭТЦПК 7500/10-У2 – без бака и масла до просушки изоляции после сборки (г); без бака и масла после просушки (д); в баке с маслом (е)**

**Fig. 5. Histograms of voltage distribution on insulation layers for two transformers: distribution transformer TMG-100/10/0.4 – without tank and oil (a); without oil with tank (b); in tank with filled oil (v); electric furnace transformer ETSPK 7500/10-U2 – without tank and oil before insulation drying after assembly (г); without tank and oil after drying (д); in the oil tank (e)**

На основе данной информации можно своевременно предотвратить отказ трансформатора и точно установить, достаточно ли будет заменить масло для восстановления ресурса трансформатора, или же трансформатор требует перемотки.

Поступила в редакцию 04.05.2023

Принята к публикации 27.05.2023

Received 04.05.2023

Accepted 27.05.2023

### Библиографический список

- [1] Назарычев А.Н., Мельникова О.С., Сулыненков И.Н. Диагностика главной изоляции силовых трансформаторов по статистическому критерию электрической прочности масла // *Электричество*. 2022. № 9. С. 22-32. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-9-22-32
- [2] Дорожко С.В. Диагностика однофазного силового трансформатора в рабочем режиме // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2015. № 1. С. 49-50. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-1-49-52
- [3] Керимкулов Н.Н., Левин В.М. Идентификация параметров бездефектного состояния маслонаполненных трансформаторов // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. 2016. № 4 (65). С. 194-206. DOI: 10.17212/1814-1196-2016-4-194-206
- [4] Макашева С.И., Пинчуков П.С. Мониторинг состояния масляной изоляции тяговых трансформаторов на основе анализа растворенных газов // *Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона*. 2021. № 2 (27). С. 57-62.
- [5] Дагаева М.В., Каташёва Д.В., Каташёв А.С., Кирпичников А.П. Нечеткая экспертная система диагностики маслонаполненных силовых трансформаторов // *Вестник Технологического университета*. 2018. Т. 21. № 2. С. 148-154.
- [6] Шонин Ю.П. Оценка технологического состояния силовых масляных трансформаторов // *Библиотека электротехника*. 2019. № 12 (252). С. 3-90.
- [7] Высогорец С.П. Прогнозирование остаточного ресурса масел силовых трансформаторов на основе анализа качества жидкого диэлектрика // *Надежность и безопасность энергетики*. 2016. № 1 (32). С. 50-54.
- [8] Серебряков А.С. *Трансформаторы*. М.: МЭИ, 2013. – 360 с.
- [9] Серебряков А.С., Семенов Д.А. Определение оставшегося ресурса главной изоляции распределительных трансформаторов // *Электротехника*. 2013. № 6. С. 2-8.
- [10] Irungu G.K., Akumu A.O., Munda J.L. Transformer condition assessment using dissolved gas analysis, oil testing and evidential reasoning approach // 2015 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Jun. 07-10, 2015, Seattle, WA, USA: IEEE, 2015. P. 145-149. DOI: 10.1109/ICACACT.2014.7223490

### References

- [1] A.N. Nazarychev, O.S. Mel'nikova and I.N. Sulynenkov, "Diagnostics of power transformer main insulation according to the oil dielectric strength statistical criterion", *Electricity*, no. 9, pp. 22-32, 2022. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-9-22-32
- [2] S.V. Dorozhko, "Diagnosis of a single phase power transformer in operating mode", *Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics*, no. 1, pp. 49-50, 2015. DOI: 10.17213/0136-3360-2015-1-49-52



- 
- [3] N.N. Kerimkulov and V.M. Levin, "Identification of faultless condition parameters of oil-filled transformers", *Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, vol. 4, no. 65, pp. 194-206, 2016. DOI: 10.17212/1814-1196-2016-4-194-206
- [4] S.I. Makasheva and P.S. Pinchukov, "Traction transformer oil insulation monitoring on the bases of dissolved gas analysis", *Transport of the Asia-Pacific Region*, vol. 2, no. 27, pp. 57-62, 2021.
- [5] M.V. Dagaeva, D.V. Katsyova, A.S. Katsyov and A.P. Kirpichnikov, "Fuzzy expert system of oil-filled power transformer diagnostics", *Herald of Technological University*, vol. 21, no. 2, pp. 148-154, 2018.
- [6] Yu.P. Shonin, "Otsenka tekhnologicheskogo sostoyaniya silovykh maslyanykh transformatorov [Assessment of the technological state of power oil transformers]", *Electrical Engineering Library*, vol. 12, no. 252, pp. 3-90, 2019 (in Russian).
- [7] S.P. Vysogorets, "Prognozirovaniye ostatochnogo resursa masel silovykh transformatorov na osnove analiza kachestva zhidkogo dielektrika [Predicting the residual life of power transformer oils based on the analysis of the quality of liquid dielectric]", *Reliability and safety of energy*, vol. 1, no. 32, pp. 50-54, Jan. 2016 (in Russian).
- [8] A.S. Serebryakov, *Transformatory [Transformers]*. Moscow: MPEI, 2013 (in Russian).
- [9] A.S. Serebryakov and D.A. Semenov, "Opredeleniye ostavshegosya resursa glavnoy izolyatsii raspredelitel'nykh transformatorov [Determination of the remaining resource of the main insulation of distribution transformers]", *Elektrotehnika*, no. 6, pp. 2-8, Jun. 2013 (in Russian).
- [10] G.K. Irungu, A.O. Akumu and J.L. Munda, "Transformer condition assessment using dissolved gas analysis, oil testing and evidential reasoning approach", in *proc. 2015 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Jun. 07-10, 2015, Seattle, WA, USA, pp. 145-149. DOI: 10.1109/ICACACT.2014.7223490

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

**Серебряков Александр Сергеевич**, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, г. Княгинино, Российская Федерация.

**Aleksandr S. Serebryakov**, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Russian Federation.

**Семенов Дмитрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, г. Княгинино, Российская Федерация.

**Dmitriy A. Semenov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Russian Federation.

**Сбитнев Евгений Александрович**, старший преподаватель Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, г. Княгинино, Российская Федерация.

**Evgeniy A. Sbitnev**, senior lecturer of the Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Russian Federation.

**Сидорова Анна Владимировна**, старший преподаватель Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, г. Княгинино, Российская Федерация.

**Anna V. Sidorova**, senior lecturer of the Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Russian Federation.

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

# **SMART ELECTRICAL ENGINEERING**

**№ 4**

**Nizhny Novgorod 2023**

*The journal is issued 4 times in year*

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

**EDITORIAL STAFF**

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

**MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:**

Dauren Sadykovich Akhmetbaev	Doctor of technical sciences, associate professor of the S. Seifullin Kazakh Agro-Technical University (Astana, Republic of Kazakhstan)
Gennadiy Yakovlevich Vagin	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Leonid Abramovich German	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU Branch in Nizhny Novgorod (Nizhny Novgorod, Russia)
Valery Gennadievich Goldstein	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU (Samara, Russia)
Igor Vasilevich Gulyaev	Doctor of technical sciences, professor, professor MRSU (Saransk, Russia)
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 Roskomadzor*  
*III № ФС77-81688 on 06 Aug., 2021*

© Nizhny Novgorod State Technical University  
n.a. R.E. Alekseev, 2023

## CONTENT

<b>ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS .....</b>	<b>4</b>
<b>P.A. Dergachev, M.S. Ventserev, V.V. Astafjev.</b> Modeling of losses in stator windings slot part of turbogenerator with transposition of strands...	4
<b>A.D. Danilov, A.I. Zimin, D.A. Shiryaev, D.M. Volkov.</b> Diagnostics of high-power turbo generators by the method of spectral analysis of stator currents.....	18
<b>D.A. Aleshin, A.V. Shalukho, M.K. Yeshaev, N.M. Petukhov.</b> Development of a test bench and characteristics research of serially produced batteries.....	31
<b>V.S. Savchuk, A.S. Plekhov.</b> Welding inverter control for electric welding of high-pressure pipes.....	43
<b>T.Kh. Abuzyarov, A.B. Dar'enkov.</b> Dual inverter-fed stepper drive experimental re-search.....	55
<b>V.M. Ivanov.</b> Stepper motor control algorithms for motion controller.....	65
<b>POWER INDUSTRY .....</b>	<b>78</b>
<b>N.K. Tretyakov, V.P. Kuzmenko, O.Ya. Solenaya.</b> Simulation of voltage stabilization device of DC urban electric network.....	78
<b>V.A. Fyodorova, V.F. Kirichenko, G.V. Glazyrin.</b> Mathematical model development for study of transients in power systems general primary frequency control.....	90
<b>A.S. Serebryakov, D.A. Semenov, E.A. Sbitnev, A.V. Sidorova.</b> Technical diagnostics of power transformers main insulation. Determination of remaining resource.....	108

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

**№ 4**

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

*Редакция:*

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

Свободная цена

Подписано в печать 12.12.2023. Дата выхода в свет: 27.12.2023

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

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

---

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

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