

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 1

Нижний Новгород 2023

УДК 621.3
ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2023. № 1 (21). – 147 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»

(603950, 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

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	4
Серов А.В., Андриухин М.В., Титов В.Г., Онищенко Г.Б., Муртазин Т.Э. Сравнение способов настройки регуляторов системы управления синхронного двигателя с постоянными магнитами	4
Еремочкин С.Ю., Дорохов Д.В. Моделирование электромеханических характеристик трехфазного электродвигателя при векторно-алгоритмическом управлении в среде Matlab Simulink	22
Абузяров Т.Х., Плехов А.С., Титов В.Г., Кольчик И.В. Уменьшение размаха пульсаций выходного напряжения двойной инверторной системы в составе шагового электропривода при низких скоростях вращения вала	38
Сугаков В.Г., Хватов О.С., Тощев А.А., Зобов Л.В. Системы автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов автономных источников электроэнергии с внешней форсировкой	51
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА	62
Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Регулирование напряжения в микросети постоянного и переменного тока на базе энергоузелов и накопителей электроэнергии.....	62
Тошходжаева М.И. Моделирование основных параметров электроэнергетической системы с источником распределенной генерации при различных режимах	85
Климова Т.Г., Смирнов В.С. Оценка параметров схемы замещения двухобмоточного трансформатора на базе синхронизированных векторных измерений	102
Белов О.А. Анализ структуры генерирующей мощности и динамики электропотребления Соболевского изолированного энергоузла Камчатского края	118
ХРОНИКА	139
Лоскутову Алексею Борисовичу – 70 лет	139
Вагину Геннадии Яковлевичу – 85 лет	141

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.337.41

DOI 10.46960/2658-6754_2023_1_04

**СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ НАСТРОЙКИ
РЕГУЛЯТОРОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ
С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ****А.В. Серов**ORCID: 0000-0001-9117-8020 e-mail: andrey.serov.97@inbox.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***М.В. Андрюхин**ORCID: 0000-0002-4347-5669 e-mail: farand89@yandex.ruАО «ФНПЦ «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники»
*Нижний Новгород, Россия***В.Г. Титов**ORCID: 0000-0001-9268-4902 e-mail: eos@nntu.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Г.Б. Онищенко**ORCID: 0000-0001-7182-5374 e-mail: earu@mail.ru*Нижний Новгород, Россия***Т.Э. Муртазин**ORCID: 0000-0001-9451-5803 e-mail: tm.murtazin@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Современные системы управления электроприводов на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) строятся на базе векторного управления, которое обеспечивает энергетическую эффективность электроприводов и повышенное быстродействие по сравнению со скалярным способом управления. Обычно электропривод представляет собой систему стабилизации угловой скорости

объекта управления и реализуется в рамках замкнутой системы подчиненного регулирования координат с включением последовательных корректирующих устройств (регуляторов). Система управления электропривода, реализованная по данному принципу, включает в себя внешний контур регулирования угловой скорости ω и внутренние контуры регулирования тока I_d и I_q . Для обеспечения корректной работы системы управления актуальна задача настройки регуляторов угловой скорости ω и токов I_d и I_q . В работе проведена настройка параметров регуляторов токов I_d и I_q , а также угловой скорости ω тремя способами: с помощью имитационной модели СДПМ в программном обеспечении *Matlab Simulink*; с помощью аналитического расчета, исходя из паспортных данных электропривода; с помощью эмпирического метода Зиглера-Никольса, основанного на измерениях, сделанных на реальном объекте.

Ключевые слова: имитационная модель, метод Зиглера-Никольса, настройка регуляторов, синхронный двигатель с постоянными магнитами.

Для цитирования: Серов А.В., Андрияхин М.В., Титов В.Г., Онищенко Г.Б., Муртазин Т.Э. Сравнение способов настройки регуляторов системы управления синхронного двигателя с постоянными магнитами // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 1. С. 4-21. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_04

INTERCOMPARISON OF METHODS TO ADJUST CONTROLS OF PERMANENT MAGNETS SYNCHRONOUS MOTOR CONTROL SYSTEM

A.V. Serov

ORCID: 0000-0001-9117-8020 e-mail: andrey.serov.97@inbox.ru

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

Nizhny Novgorod, Russia

M.V. Andryukhin

ORCID: 0000-0002-4347-5669 e-mail: farand89@yandex.ru

JSC "FRPC «Nizhny Novgorod Research Institute of Radio Engineering»

Nizhny Novgorod, Russia

V.G. Titov

ORCID: 0000-0001-9268-4902 e-mail: eos@nntu.ru

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

Nizhny Novgorod, Russia

G.B. Onishchenko

ORCID: 0000-0001-7182-5374 e-mail: eapu@mail.ru

Nizhny Novgorod, Russia

T.E. Murtazin

ORCID: **0000-0001-9451-5803** e-mail: **tm.murtazin@yandex.ru**

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

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Modern control systems of electric drives based on a permanent magnets synchronous motor (PMSM) are built on the basis of vector control, which provides energy efficiency of electric drives and increased speed compared to the scalar control method. Usually, the electric drive is a system for stabilizing the angular velocity of the control object and is implemented within a closed system of subordinate regulation of coordinates with the inclusion of sequential corrective devices (regulators). The electric drive control system, implemented according to this principle, includes an external angular velocity control circuit ω and internal current control circuits I_d and I_q . To ensure the correct operation of the control system, the task of adjusting the angular velocity regulators ω and the currents I_d and I_q remains relevant. The parameters of the I_d and I_q current regulators, as well as the angular velocity ω , were adjusted in three ways: using the PMSM simulation model in the Matlab Simulink software; using an analytical calculation based on the passport data of the electric drive; using the empirical Ziegler-Nichols method based on measurements made on a real object.

Keywords: simulation model, Ziegler-Nichols method, permanent magnets synchronous motor, regulator setting.

For citation: A.V. Serov, M.V. Andryukhin, V.G. Titov, G.B. Onishchenko and T.E. Murtazin, "Intercomparison of methods to adjust controls of permanent magnets synchronous motor control system", *Smart Electrical Engineering*, no 1, pp. 4-21, 2023.

DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_04

I. Введение

Автоматизация процессов управления различными объектами сопровождается широким использованием электроприводов. Они присутствуют в продукции самых разных отраслей: в медицинском оборудовании, в станках с числовым программным управлением, в системах управления объектами вооружения и управления вращением радиолокационных станций и т.д. Круг задач, связанных с внедрением электропривода, весьма широк.

Благодаря расширению элементной базы, используемой при разработке электроприводов, применению быстродействующих силовых полупроводниковых элементов и развитию теории управления электрическими машинами переменного тока практически решена задача использования синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ). Применение электропривода на базе СДПМ за счет высоких энергетических характеристик электродвигателя позволяет создавать системы безредукторного (прямого) привода, что значительно улучшает показатели надежности и динамические характеристики объекта управления. Различные объекты управления предъявляют конкретные технические требования к электроприводу:

диапазон поддержания заданных скоростей, время разгона, точность поддержания скорости и прочие. Но для каждого электропривода, вне зависимости от того, каким объектом он управляет, возникает необходимость настройки системы управления. Она строится по принципу замкнутой системы подчиненного регулирования координат, при этом внешним является контур скорости, а внутренними – контуры тока I_d и I_q . Для обеспечения корректной работы системы управления остается актуальной задача синтеза регуляторов скорости и тока.

В [1, 2] рассмотрен ряд вопросов, связанных с построением систем управления электропривода на базе СДПМ. В [3] затрагиваются вопросы, связанных с технической реализацией электропривода, настройкой регуляторов и математическим моделированием процессов в нем. Вместе с тем, до настоящего времени не исследован ряд вопросов:

- автоматическая настройка регуляторов тока и скорости в системе с подчиненным регулированием параметров с помощью использования инструмента *Response Optimization* в *Matlab Simulink*;
- аналитический подход по паспортным данным электропривода;
- эмпирический метод Зиглера-Никольса, основанный на измерениях, сделанных на реальном объекте.

II. Аппаратная часть

В качестве объекта управления выбран тихоходный высокомоментный электродвигатель СДПМ-206-90-380 (АО «ПО «Север»») [4]. Такие двигатели применяются для построения приводов вращения исполнительного механизма без применения механического редуктора. Для управления двигателем применен силовой преобразователь с отладочной платой *MotorControlBoard* [5], разработанный ООО «НПФ ВЕКТОР» для исследования, создания и отладки программного обеспечения на базе референсного контроллера с процессором K1921BK01T фирмы ОАО «НИИЭТ». Основные технические характеристики электропривода приведены в [4].

III. Имитационная модель

Электропривод представляет собой систему стабилизации угловой скорости объекта управления и реализуется в рамках замкнутой системы подчиненного регулирования координат с включением последовательных корректирующих устройств (регуляторов). В многоконтурной системе автоматического управления (САУ) такого типа задающее воздействие на внутренний контур формируется с выхода регулятора внешнего контура. Система управления электропривода, реализованная по данному принципу, включает в себя внешний контур регулирования угловой скорости ω и внутренний контур регулирования тока токов I_d и I_q СДПМ.

Одним из первых этапов разработки электропривода является составление имитационной модели, адекватной будущей САУ. При построении

имитационной модели с внешним контуром регулирования угловой скорости ω и внутренним контуром регулирования тока токов I_d и I_q для неявнополюсного СДПМ использовались уравнения, приведенные в [6]. Данная модель построена в программном продукте *Matlab Simulink* и изображена на рис. 1. Настройка регуляторов токов I_d и I_q и угловой скорости ω на модульный оптимум выполнена с помощью использования инструмента *Response Optimization* в *Matlab Simulink*, который позволяет выполнить автоматическую настройку пропорциональной и интегральной частей [1]. В данном инструменте необходимо задать границу перерегулирования и время переходного процесса. Верхняя граница с перерегулированием была задана 4,3 %, и далее коридор с допуском ± 1 % от заданного значения.

Для определения времени переходного процесса введем обозначение:

$$T_{\text{кр}} = \frac{L_d}{R} = \frac{0,076}{13,5} = 0,0056 \text{ с}, \quad (1)$$

где $T_{\text{кр}}$ – постоянная времени контура тока.

Время переходного процесса примем равной одной постоянной контура тока:

$$t_{\text{пр}} = T_{\text{кр}} = 0,0056 \text{ с}. \quad (2)$$

Постоянную времени контура скорости принимаем:

$$T_c = 2T_{\text{кр}} = 2 \cdot 0,0056 = 0,112 \text{ с}. \quad (3)$$

Время переходного процесса контура угловой скорости ω принимаем равной трем постоянным времени контура тока:

$$t_{\text{ис}} = 3T_{\text{кр}} = 3 \cdot 0,0056 = 0,0168 \text{ с}. \quad (4)$$

Для неявнополюсного СДПМ индуктивности обмотки статора по продольной и поперечной осям ротора равны $L_d = L_q$, следовательно, параметры регуляторов токов I_d и I_q будут совпадать. В связи с этим достаточно настроить параметры регулятора тока I_q и продублировать их в регулятор тока I_d .

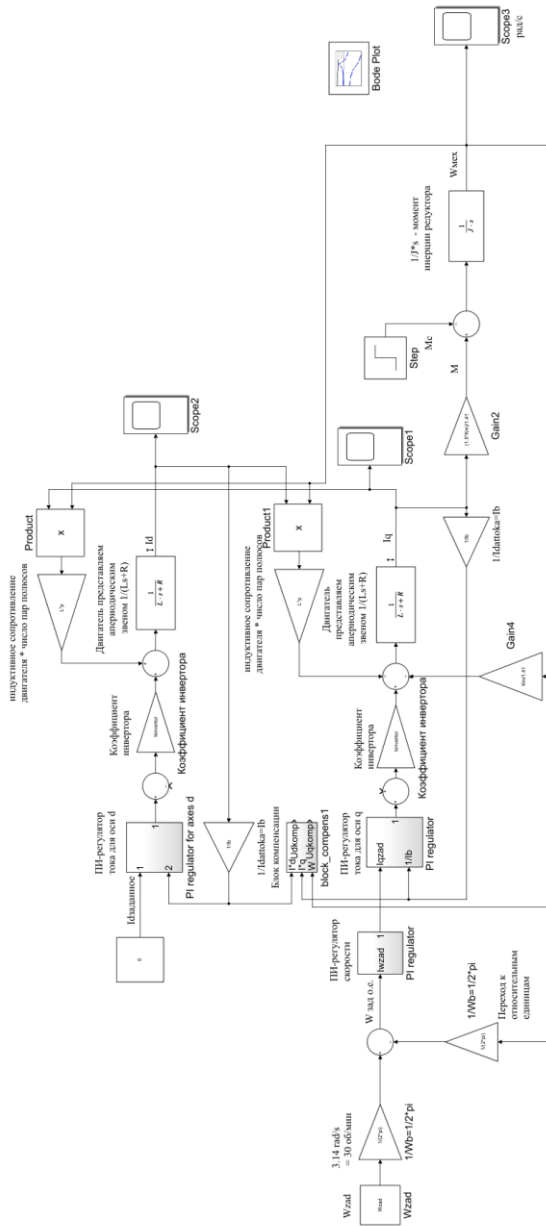


Рис. 1. Модель системы векторного управления с внешним контуром скорости и внутренним контуром тока во вращающихся системах координат $d-q$

Fig. 1. Model of a vector control system with external speed loop and internal current loop in rotating coordinate systems $d-q$

Оптимизация контура скорости проводилась при моменте нагрузки, равном нулю. Заданные параметры настройки регуляторов показаны на рис. 2.

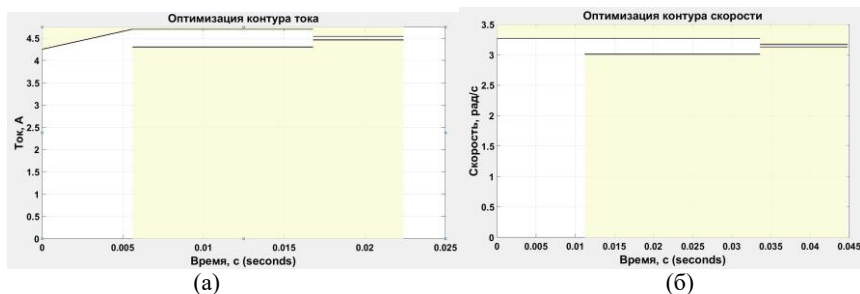


Рис. 2. Заданные границы для настройки регуляторов тока и скорости в инструменте *Response Optimization*: контур тока (а); контур скорости (б)

Fig. 2. The targeted limits for setting current and speed regulators in the *Response Optimization* tool: current loop (a); speed loop (b)

Matlab Simulink оптимизировал коэффициенты пропорциональной и интегральной части регулятора тока I_q и угловой скорости ω , дав следующие значения для контура тока:

$$\begin{aligned} k_{\text{п}} &= 126,59; \\ k_{\text{и}} &= 3,04. \end{aligned} \quad (5)$$

Получаем следующие значения коэффициентов пропорциональной и интегральной части для контура скорости:

$$\begin{aligned} k_{\text{ис}} &= 1,43; \\ k_{\text{ис}} &= 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Осциллограммы выходных сигналов контуров тока I_q и угловой скорости ω после настройки приведены на рис. 3. Из них видно, что инструмент *Response Optimization* настроил коэффициенты пропорциональной и интегральной части таким образом, что достигается заданное перерегулирование и качество переходного процесса [7].

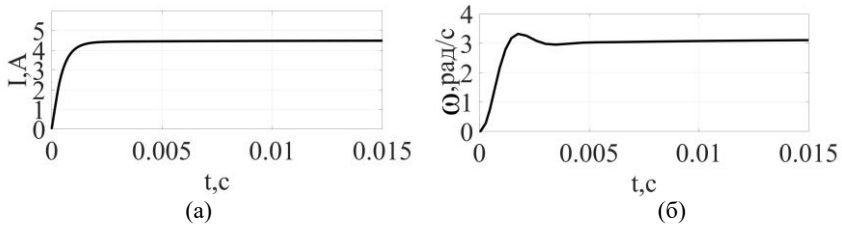


Рис. 3. Сигнал тока I_q и угловой скорости ω после оптимизации регуляторов инструментом *Response Optimization*: ток I_q (а); угловая скорость ω (б)

Fig. 3. Signal of current I_q and angular rotation ω , after optimization of controllers by the *Response Optimization* tool: current I_q (a); angular velocity ω (b)

Далее была определена устойчивость системы с помощью логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ), показанной на рис. 4.

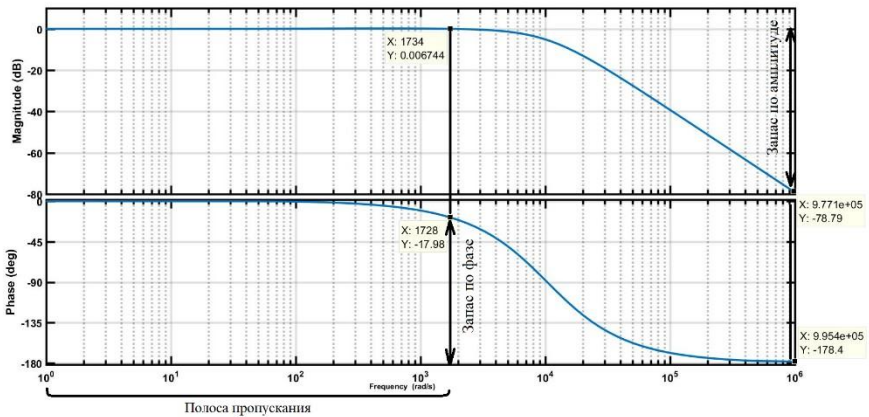


Рис. 4. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика в замкнутой системе по скорости

Fig. 4. Logarithmic amplitude-frequency response in a closed system in terms of speed

По ЛАЧХ были определены запасы устойчивости по амплитуде и фазе, а также полоса пропускания. Так, в замкнутой системе по скорости запас по фазе составляет:

$$\Delta\varphi = 180^\circ - 18^\circ = 162^\circ. \quad (7)$$

Для определения запаса по амплитуде проводим прямую в точке, где фазная характеристика приближена к 180° . Из рис. 4 видно, что запас по амплитуде равен более 78 дБ.

Полосу пропускания определим от начала ЛАЧХ до того момента, когда график пересечет ось частот, что составляет примерно 1,7 кГц.

IV. Аналитический способ

При данном способе предлагается рассчитать параметры регуляторов без применения инструмента *Response Optimization*, используя паспортные данные электропривода. Синтез регуляторов выполнен на основе принципов подчиненного регулирования с использованием метода компенсации нелинейных связей [2].

Рассмотрим синтез регулятора по оси d . Структурная схема контура тока по оси d изображена на рис. 5.

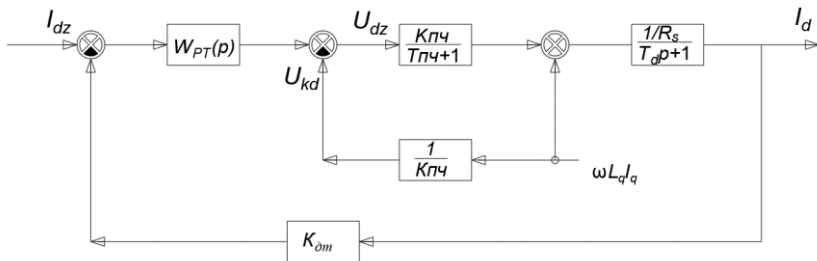


Рис. 5. Структурная схема контура тока по оси d

Fig. 5. Structural diagram of the current loop along the d axis

Влияние перекрестной связи полностью скомпенсировано, а транзисторный преобразователь представляется безынерционным звеном, поскольку чистое запаздывание транзисторного преобразователя на несущей частоте 5 кГц равняется приблизительно 0,0002 с, а постоянная времени контура тока 0,0056 с, т.е. в 28 раз больше. Это дает нам право не учитывать постоянную времени преобразователя.

Приняты следующие допущения:

- 1) электромагнитная постоянная времени существенно больше малой некомпенсируемой постоянной времени $T_s > T_\mu$;
- 2) нужно получить астатическую систему и скомпенсировать наибольшую постоянную времени, поэтому регулятор должен обладать интегральной частью и форсирующим звеном.

Выполним настройку контура на модульный оптимум с малой некомпенсируемой постоянной времени $T_{KT} = T_i$.

Запишем передаточную функцию разомкнутого контура тока [8]:

$$W_{\text{раз}}(p) = W_{pi}(p) \cdot \frac{k_{\text{шим}} \cdot k_{\text{оси}}}{(L \cdot p + R_s)}, \quad (8)$$

где $W_{pi}(p) = k_{pi} + \frac{k_{ii}}{p}$ – передаточная функция пропорционально-интегрального регулятора тока; $k_{\text{шим}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{он}} = \sqrt{2} \cdot 380 = 540$ – коэффициент передачи ШИМ; $U_{\text{он}}$ – напряжение питания инвертора напряжения; $L = L_d = L_q$ – индуктивность обмотки статора по продольной и поперечной осям; R_s – активное сопротивление фазы статора при рабочей температуре; $k_{\text{оси}}$ – коэффициент обратной связи по току.

При настройке на модульный оптимум:

$$W_{\text{рази}}(p) = W_{\text{размо}}(p) = \frac{1}{a \cdot \tau_{\mu} \cdot p \cdot (\tau_{\mu} \cdot p + 1)}, \quad (9)$$

где a – коэффициент, определяющий форму переходного процесса по току, при настройке на модульный оптимум $a = 2$; τ_{μ} – малая некомпенсируемая постоянная времени, связанная с дискретностью переключения ключей при частоте ШИМ равной 5 кГц [3].

Учитывая, что $\omega_{\text{спи}} = \frac{1}{a \cdot \tau_{\mu}} = \frac{1}{2 \cdot 0,0002} = 2500$ Гц – собственная частота контура регулирования тока, из (4) и (5) получаем:

$$k_{pi} = \frac{\omega_{\text{спи}} \cdot L}{k_{\text{шим}} \cdot k_{\text{оси}}} = \frac{2500 \cdot 0,076}{540 \cdot \frac{1}{9}} = 3,17; \quad (10)$$

$$k_{ii} = \frac{\omega_{\text{спи}} \cdot R}{k_{\text{шим}} \cdot k_{\text{оси}}} = \frac{2500 \cdot 13,5}{540 \cdot \frac{1}{9}} = 562,5.$$

Поскольку $T_{\text{кт}} = \frac{L}{R} = 0,0056$ с – электромагнитная постоянная времени двигателя, то:

$$k_{ii} = \frac{k_{pi}}{T_{кр}} = \frac{3,17}{0,0056} = 566. \quad (11)$$

Рассмотрим синтез регулятора скорости. Настройка контура производится на симметричный оптимум по методике параметрического синтеза пропорционально–интегрального регулятора частоты вращения для систем подчиненного регулирования приводов с транзисторными преобразователями по условию обеспечения заданной реакции на возмущающее воздействие [9].

Структурная схема регулятора скорости изображена на рис. 6.

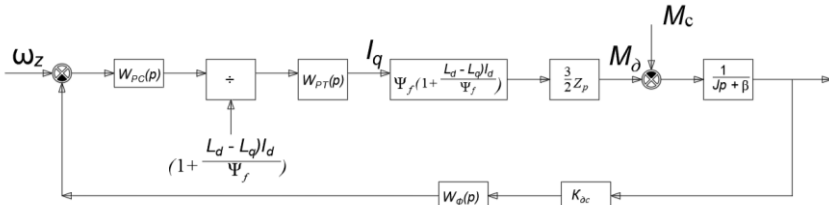


Рис. 6. Структурная схема регулятора скорости

Fig. 6. Structural diagram of the speed controller

При синтезе данной схемы приняты допущения:

- 1) будем рассматривать случай только для неявнополусных машин, поэтому $L_q = L_d$;
- 2) при управлении СДПМ будем использовать энергоэффективный режим, при котором $I_d = 0$.

Получим передаточную функцию регулятора скорости:

$$W_{pc}(p) = k_{pc} + \frac{k_{ic}}{p}; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} k_{pc} &= \omega_{cpc} \cdot \tau \cdot \frac{RefM}{Ref\omega} = \omega_{cpc} \cdot \frac{\omega_n \cdot J}{M_n} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot I_n \cdot K_{oc}}{\omega_n \cdot K_{occo}} = \\ &= \omega_{cpc} \cdot \frac{J \cdot \sqrt{2} \cdot I_n \cdot K_{oc}}{M_n \cdot K_{occo}} = 1250 \cdot \frac{0,0481 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,4 \cdot \frac{1}{9}}{90 \cdot \frac{1}{2\pi}} = 0,92, \end{aligned} \quad (13)$$

где ω_{cpc} – частота среза ЛАЧХ разомкнутого контура регулирования скорости $\omega_{cpc} = \frac{\omega_{cpi}}{2} = \frac{2500}{2} = 1250$; $\tau = \omega_n \cdot J / M_n$ – параметр привода, характеризу-

ющий быстродействие контура регулирования скорости; J – момент инерции электродвигателя; $\operatorname{Re} fM = \sqrt{2}I_n K_{oc}$ и $\operatorname{Re} f\omega = \omega_n K_{осо}$ – задающие воздействия по моменту и частоте вращения привода, соответствующие номинальным значениям этих величин.

$$\begin{aligned}
 k_{ic} &= \omega_{cpc}^2 \cdot \tau \cdot \frac{1}{a_c} \cdot \frac{\operatorname{Re} fM}{\operatorname{Re} f\omega} = \omega_{cpc}^2 \cdot \frac{\omega_n \cdot J}{M_n} \cdot \frac{1}{a_c} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot I_n \cdot K_{oc}}{\omega_n \cdot K_{осо}} = \\
 &= \omega_{cpc}^2 \cdot \frac{J \cdot \sqrt{2} \cdot I_n \cdot K_{oc}}{M_n \cdot a_c \cdot K_{осо}} = 1250^2 \cdot \frac{0,0481 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,4 \cdot \frac{1}{9}}{90 \cdot 2 \cdot \frac{1}{2\pi}} = 575,
 \end{aligned} \tag{14}$$

где a_c – коэффициент, определяющий форму переходного процесса по скорости (при стандартной настройке $a_c = 2$).

При настройке параметров регуляторов аналитическим способом наглядно видно, от каких параметров системы зависят коэффициенты.

IV. Эмпирический способ. Метод Зиглера-Никольса

Один из традиционных путей проектирования ПИД-регулятора – использование эмпирических правил настройки, основанных на измерениях, сделанных на реальном объекте [10].

Регуляторы тока необходимы для замкнутых по току структур управления, включая векторное управление. Для их настройки необходимо наблюдать на осциллограмме реакцию на скачок задания тока при остановленном двигателе [11]. Настраивать регуляторы токов для реальной эксплуатации привода будем с уровнем тока, равным половине номинального.

Сначала интегральный коэффициент обнуляется, а пропорциональный – постепенно повышается до появления колебательности переходного процесса. С каждым изменением коэффициентов нужно подавать команду *останов* и пускать привод снова, чтобы загрузить осциллограмму и оценить вид переходного процесса. Коэффициенты для обоих регуляторов тока должны быть равны и меняются одновременно. При этом в контуре будет статическая ошибка. Устраним ее с помощью интегральной части регулятора. После получения заданного переходного процесса с несколькими колебаниями, пропорциональный коэффициент нужно уменьшить и перейти к повышению интегрального коэффициента.

По окончании грубой настройки необходимо произвести финальный подбор обоих коэффициентов регуляторов, чтобы получить переходной процесс, похожий на настройку на модульный оптимум. Получаем следующие коэффициенты регулятора тока:

$$\begin{aligned} k_{\text{пэмип}} &= 3,5; \\ k_{\text{измп}} &= 175. \end{aligned} \quad (15)$$

Желаемый переходной процесс показан на рис. 7.

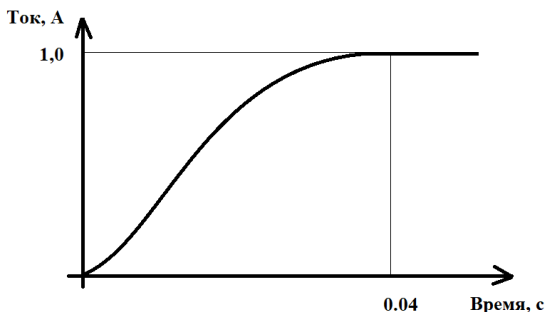


Рис. 7. Осциллограммы сигналов тока, при настройке контура на модульный оптимум

Fig. 7. Oscillograms of current signals, when the circuit is tuned to the modular optimum

Подобным же образом настраивается регулятор скорости. Получаем следующие коэффициенты регулятора скорости:

$$\begin{aligned} k_{\text{псэмип}} &= 0,3; \\ k_{\text{изспип}} &= 2,5. \end{aligned} \quad (16)$$

Переходной процесс контура скорости показан на рис. 8.

Таким образом, с данными коэффициентами систему можно считать настроенной.

V. Выводы

Произведена настройка параметров регуляторов токов I_d и I_q , а также угловой скорости ω тремя способами:

- с помощью имитационной модели синхронного двигателя с постоянными магнитами в программном обеспечении *Matlab Simulink*;
- с помощью аналитического расчета, исходя из паспортных данных электропривода;
- с помощью эмпирического метода Зиглера-Никольса, основанного на измерениях, сделанных на реальном объекте.

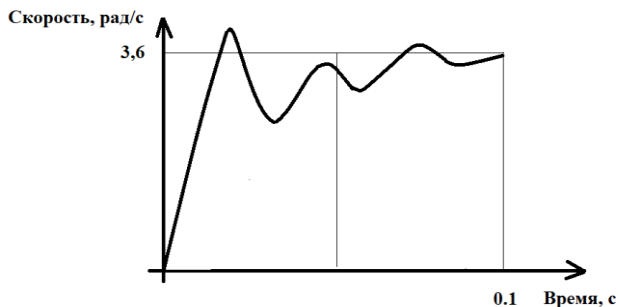


Рис. 8. Осциллограммы сигналов угловой скорости, при настройке контура на симметричный оптимум

Fig. 8. Oscillograms of the angular rotation signals, when the circuit is tuned to a symmetrical optimum

Сравнение параметров регуляторов, полученных разными способами приведены в табл. 1.

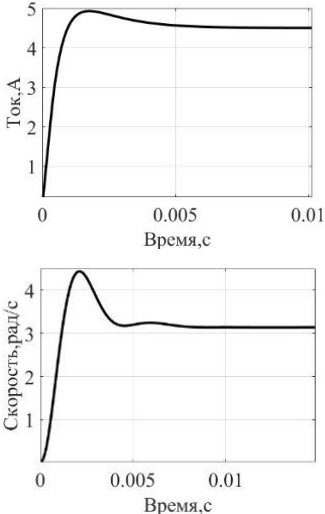
Из табл. 1 видно, что пропорциональный коэффициент регулятора тока получился приблизительно одинаковым во всех трех методах, что говорит о правильности проведенного исследования и корректности результатов. При этом интегрирующая часть получилась одного порядка во всех трех методах. Различия связаны со спецификой оптимизации каждого метода, поскольку интегрирующая часть определяет быстроту дотягивания и исключение статической ошибки.

Подобным образом синтезируем результаты по настройке регулятора контура скорости. При аналитическом подходе и цифровом моделировании пропорциональный коэффициент практически одинаков, при эмпирической настройке он получился меньше вследствие того, что в системе электропривода не учтен момент инерции исполнительного механизма. Значения интегрального коэффициента, рассчитанные методами моделирования и эмпирическим путем, получились одного порядка; аналитический подход показал, что его значение должно быть выбрано намного больше.

Следует отметить, что имитационное моделирование позволяет оценить запасы устойчивости и реакцию на единичный скачок, аналитический метод позволяет понять, от чего зависят коэффициенты, а эмпирический метод предоставляет возможность определить ошибку в расчетах и неучтенные параметры реальной системы, например, момент инерции исполнительного механизма.

Таблица 1.
Сравнение коэффициентов регуляторов
при различных подходах оптимизации

Table 1.
Comparison of regulator coefficients for different optimization approaches

Оциллограмма сигналов	Коэффициенты регулятора
Имитационное моделирование	
<p style="text-align: center;">рис. 3 а</p> <p style="text-align: center;">рис. 3 б</p>	$k_{ii} = 3,04;$ $k_{ii} = 126,59.$ $k_{ic} = 1,43;$ $k_{ic} = 1.$
Аналитический способ	
	$k_{pi} = 3,17;$ $k_{ii} = 562,5.$ коэффициенты регулятора тока $k_{pc} = 0,92;$ $k_{ic} = 575.$ коэффициенты регулятора скорости
Метод Зиглера-Никольса	
<p style="text-align: center;">рис. 7</p> <p style="text-align: center;">рис. 8</p>	$k_{измп} = 3,5;$ $k_{измп} = 175.$ $k_{исмп} = 0,3;$ $k_{исмп} = 2,5.$

Таким образом, в работе выявлены особенности настройки системы с подчиненным регулированием параметров различными способами.

© Серов А.В., 2023
© Андрухин М.В., 2023
© Титов В.Г., 2023
© Онищенко Г.Б., 2023
© Муртазин Т.Э., 2023

Поступила в редакцию 30.06.2022

Received 30.06.2022

Библиографический список

- [1] Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. – 264 с.
- [2] Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. – 298 с.
- [3] Iohimovich A.D., Korovin A.V., Pankratov V.V. The development of the direct electric drive system of a radar station antenna // proc. 2013 14th International Conference on Young Specialist on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, July 1-5, 2013, Novosibirsk, Russia. IEEE, 2013. P. 300-304. DOI: 10.1109/EDM.2013.6642000
- [4] Вентильные (синхронные) двигатели в Новосибирске // АО «ПО «Север». [Электронный ресурс]. URL: https://posever.ru/prod/elektrodvigateli/g_51 (дата обращения 30.03.2022).
- [5] Отладочный комплект MotorControlBoard // НПФ Вектор. [Электронный ресурс]. URL: <https://motorcontrol.ru/production/controlcards/motorcontrolboard/> (дата обращения 01.04.2022).
- [6] Дьяконов В.П. MATLAB R2007/2008/2009 для радионженеров. М.: ДМК Пресс, 2010. – 976 с.
- [7] ЦИТМ Экспонента // Хабр. [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/company/etmc_exponenta/blog/513904/ (дата обращения 03.04.2022).
- [8] Нос О. В. Разработка и оптимизация алгоритмов управления асинхронным электроприводом на основе метода непрерывной иерархии: дис. канд. техн. наук, НГТУ, Новосибирск, 1999. – 250 с.
- [9] Берестов В.М., Панкратов В.В. Параметрический синтез контура регулирования скорости транзисторного привода по возмущающему воздействию // Электричество. 2006. № 12. С. 32-36.
- [10] Гудвин Г.К., Грэм К. Проектирование систем управления. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.
- [11] Описание программного обеспечения MotorControlDemo. Руководство программиста/пользователя. М.: ООО «НПФ ВЕКТОР», 2019. – 91 с.

References

- [1] G.G. Sokolovsky, *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniyem [Electric drives of alternating current with frequency regulation]*. Moscow: Academy, 2006 (in Russian).
- [2] A.B. Vinogradov, *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka [Vector control of AC drives]*. Ivanovo: GOUVPO "Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin", 2008 (in Russian).
- [3] A.D. Iohimovich, A.V. Korovin and V.V. Pankratov, "The development of the direct electric drive system of a radar station antenna", in proc. *2013 14th International Conference on Young Specialist on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, July 1-5, 2013, Novosibirsk, Russia, 2013, pp. 300-304. DOI: 10.1109/EDM.2013.6642000
- [4] Ventil'nye (sinhronnye) dvigateli v Novosibirske [Valve (synchronous) motors in Novosibirsk]. [Online]. Available at: https://psever.ru/prod/elektrodvigateli/g_51 [Accessed: Mar. 30, 2022] (in Russian).
- [5] Otladochnyj komplekt MotorControlBoard [MotorControlBoard debug kit]. [Online]. Available at: <https://motorcontrol.ru/production/controlcards/motorcontrolboard/> [Accessed: Apr. 1, 2022] (in Russian).
- [6] V.P. Dyakonov, *MATLAB R2007/2008/2009 dlya radioinzhenerov [MATLAB R2007/2008/2009 for radio engineers]*. Moscow: DMK Press, 2010 (in Russian).
- [7] CITM Eksponenta [CITM Exponenta]. [Online]. Available at: https://habr.com/ru/company/etmc_exponenta/blog/513904/ [Accessed: Mar. 4, 2022] (in Russian).
- [8] O.V. Nos, "Razrabotka i optimizaciya algoritmov upravleniya asinhronnym elektroprivodom na osnove metoda nepreryvnoj ierarhii [Development and optimization of control algorithms for an asynchronous electric drive based on the continuous hierarchy method]", Cand. of Tech. S. thesis, NSTU, Novosibirsk, Russia, 1999 (in Russian).
- [9] V.M. Berestov and V.V. Pankratov, "Parametric synthesis of a loop for regulating the speed of a transistor drive to a disturbance", *Electricity*, no. 12, pp. 32-36, 2006.
- [10] G.K. Goodwin and K. Grem, *Proektirovanie sistem upravleniya [Designing control systems]*. Moscow: BINOM. Laboratory of knowledge, 2004 (in Russian).
- [11] Opisaniye programmnoy obespecheniya MotorControlDemo. Rukovodstvo programmista/pol'zovatelya [Description of MotorControlDemo software. Programmer's/User's Guide]. Moscow: OOO «NPF VEKTOR», 2019 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Серов Андрей Валерьевич, магистрант Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Andrey V. Serov, master of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Андрюхин Максим Владимирович, ведущий инженер АО «ФНПЦ «ННИИРТ», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Maksim V. Andryukhin, senior engineer of JSC «FNPC “NNIIRT», Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Титов Владимир Георгиевич, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Vladimir G. Titov, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Онищенко Георгий Борисович, доктор технических наук, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Georgy B. Onishchenko, D. Sci. (Eng.), Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Муртазин Тимур Эмильевич, аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Timur E. Murtazin, postgraduate student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ВЕКТОРНО- АЛГОРИТМИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

С.Ю. Еремочкин

ORCID: 0000-0001-6753-8305 e-mail: S.Eremochkin@yandex.ru

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
Барнаул, Россия

Д.В. Дорохов

ORCID: 0000-0001-6564-5879 e-mail: danil.dorokhov.2000@mail.ru

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
Барнаул, Россия

В статье представлены имитационные модели, позволяющие рассмотреть основные характеристики электропривода, что значительно снижает расходы на проведение опытных испытаний. Применение таких моделей оправдано на начальных этапах разработки новых схем частотных преобразователей с целью оценки характеристик. В частности, они использованы при разработке оригинальных схем частотных преобразователей векторно-алгоритмического типа, разработанных в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова. Эта разработка – альтернатива существующим частотным преобразователям, актуальная в ситуациях, когда у потребителя отсутствует доступ к трехфазной сети переменного тока, необходимой для эксплуатации широко распространенных трехфазных асинхронных двигателей.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, имитационное моделирование, *Matlab Simulink*, частотный преобразователь, электропривод.

Для цитирования: Еремочкин С.Ю., Дорохов Д.В. Моделирование электро-механических характеристик трехфазного электродвигателя при векторно-алгоритмическом управлении в среде *Matlab Simulink* // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 1. С. 22-37. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_22

MODELING OF ELECTROMECHANICAL CHARACTERISTICS OF SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTOR WITH VECTOR-ALGORITHMIC CONTROL IN MATLAB SIMULINK

S.Y. Eremochkin

ORCID: **0000-0001-6753-8305** e-mail: **S.Eremochkin@yandex.ru**
Polzunov Altai State Technical University
Barnaul, Russia

D.V. Dorokhov

ORCID: **0000-0001-6564-5879** e-mail: **danil.dorokhov.2000@mail.ru**
Polzunov Altai State Technical University
Barnaul, Russia

Abstract. Currently, in most cases, electric motors are used to convert electrical energy into mechanical energy. Among them, the most common are three-phase asynchronous motors. There are some reasons for this. Squirrel cage induction motors have a reliable design, low cost, are easy to operate, and their characteristics are suitable for solving many problems. However, their operation puts forward a number of special requirements. In particular, a three-phase AC network is required for their connection. However, in some cases, individual consumers do not have access to a three-phase AC network. In this case, as an alternative to the existing frequency converters, it is possible to use original schemes of frequency converters of the vector-algorithmic type developed at Polzunov Altai State Technical University, that have a simpler design and low cost. At the initial stages of developing new circuits of frequency converters to evaluate the characteristics, it is justified to use computer modeling tools. Simulation models allow you to consider the main characteristics of the drive. In this case, the cost of pilot testing is significantly reduced.

Keywords: asynchronous electric motor, Matlab Simulink, simulation modeling, frequency converter, electric drive.

For citation: S.Y. Eremochkin and D.V. Dorokhov, “Modeling of electromechanical characteristics of squirrel cage induction motor with vector-algorithmic control in Matlab Simulink”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 22-37, 2023.
DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_22

I. Введение

Автоматизированный электропривод является важной частью современного промышленного производства, его энергетической и интеллектуальной основой [1-3]. Современный электропривод включает: электрический преобразователь, устройство управления, электродвигатель, механи-

ческую передачу, рабочий орган. Для его эффективной работы наиболее важен выбор электродвигателя. Он должен соответствовать всем техническим требованиям, таким как надежность, степень защиты, КПД, коэффициент мощности, частота вращения, мощность и т.д. На выбор электродвигателя также оказывают влияние условия рабочей среды – загрязненность воздуха, влажность, параметры питающей сети. К основным типам электродвигателей относят следующие: синхронный и асинхронный двигатель, двигатель постоянного тока и вентильный двигатель. Среди них наибольшее распространение получили трехфазные асинхронные короткозамкнутые двигатели, которые отличаются высокой надежностью, прочностью, простотой в эксплуатации. Данный тип двигателей используется в большинстве приводов механизмов современных промышленных предприятий, домашних и фермерских хозяйств [4, 5]. Между тем, далеко не всегда возможно питание электродвигателей от трехфазной сети. В таких случаях встает вопрос о подключении двигателей к однофазной электрической сети.

Для решения данной проблемы в Алтайском государственном техническом университете им. И. И. Ползунова на базе кафедры «Электротехника и автоматизированный электропривод» разрабатываются устройства запуска, работы и регулирования скорости трехфазных электродвигателей, которые питаются от однофазной сети. Принцип работы подобных устройств основан на методе векторно-алгоритмического управления, который позволяет управлять вращающимся магнитным полем статора двигателя. Напряжение на статорные обмотки в этом случае подается по строго заданному алгоритму и нужной полярности. Использование данного принципа позволяет, в том числе, обеспечить дискретное регулирование угловой скорости электродвигателя. Целесообразность использования дискретного регулирования обусловлена особенностью ряда электроприводов, в которых не требуется обеспечения плавного регулирования скорости. Предлагаемое техническое решение по сравнению с известными обладает рядом преимуществ: его более низкая конечная стоимость и более высокая надежность. Эти преимущества возникают за счет упрощенной системы и органов управления и реализации только дискретного регулирования скорости.

Как правило, в основе материальной базы устройств управления полем статора двигателя лежат полупроводниковые элементы, такие как транзисторы, тиристоры и диоды. Одним из таких устройств является реверсивное полупроводниковое устройство регулирования скорости трехфазного асинхронного электродвигателя [6]. С помощью данного устройства можно осуществлять регулирование угловой скорости трехфазного асинхронного электродвигателя в широком диапазоне при пуске и работе от однофазной сети. Появляется возможность создания нескольких типов круговых полей

статора, в результате частота вращения электродвигателя меняется дискретно. На первых этапах проектирования подобных устройств частотного регулирования возникает необходимость в достаточно быстрой и недорогой проверке их работоспособности. В связи с высокой стоимостью создания опытных образцов, в последнее время все чаще прибегают к методам компьютерного моделирования. Подобный опыт широко распространен как среди российских, так и среди зарубежных специалистов [7-15].

II. Моделирование характеристик трехфазного асинхронного электродвигателя при работе от трехфазной сети

Работа трехфазного асинхронного электродвигателя описывается сложной системой из дифференциальных и интегральных уравнений, поэтому выбор программного обеспечения для моделирования работы электропривода определяется возможностями программы в области решения математических уравнений, а также визуализации полученных в ходе виртуального эксперимента данных. Для создания имитационной модели преобразователя векторно-алгоритмического типа была выбрана интерактивная среда *Matlab Simulink*. Ее преимуществом по сравнению с другим программным обеспечением является возможность моделирования электрических машин, а также графическое отображение результатов моделирования.

Учитывая, что при векторно-алгоритмическом управлении двигателя статорные обмотки запитываются несимметрично, была разработана оригинальная математическая модель асинхронного двигателя, которая позволяет рассчитывать статические и динамические режимы при несимметричном питании. На основе оригинальной математической модели для моделирования характеристик электропривода была разработана имитационная модель трехфазного асинхронного электродвигателя [16]. Для создания модели математические уравнения асинхронного двигателя составляются из библиотечных блоков среды *Simulink*. Пример подсистемы вычисления коэффициента мощности показан на рис. 1.

После того как все уравнения составлены, все блоки-подсистемы объединяются в одну систему при помощи функции маскировки. Для системы задаются значения параметров, которые будут использоваться внутри системы во время расчетов, т.е. постоянные коэффициенты уравнений асинхронного двигателя. В итоге получается блок-модель асинхронного двигателя (рис. 2).

Моделирование параметров электропривода проводилось при питании двигателя от трехфазной сети. Был выбран асинхронный электродвигатель 4AA50B4У3, статорные обмотки которого соединены по схеме «звезда». Параметры электродвигателя представлены в табл. 1.

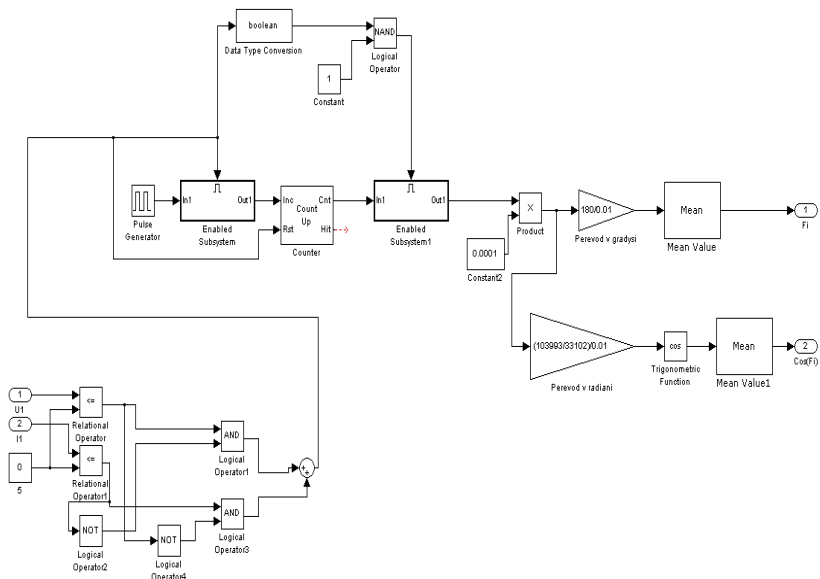


Рис. 1. Подсистема вычисления коэффициента мощности

Fig. 1. Power factor calculation subsystem

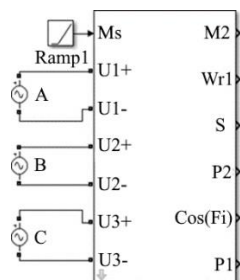


Рис. 2. Блок асинхронного двигателя

Fig. 2. Induction motor block

По паспортным данным электродвигателя были рассчитаны параметры схемы замещения (табл. 2). В начале времени моделирования осуществляется пуск электродвигателя на холостом ходу. В интервале времени от 0,2 до 0,35 с на вал двигателя подается линейно возрастающая до 0,64 Нм нагрузка, после чего увеличение подаваемого момента нагрузки прекращается. Результаты моделирования представлены на рис. 3-5.

Таблица 1.
Параметры электродвигателя

Table 1.
Motor parameters

Параметр	Значение
Номинальная мощность на валу P_n , кВт	0,09
Номинальное напряжение питания U_n , В	220
Синхронная частота вращения n , об/мин	1500
Частота питающего напряжения f , Гц	50
Номинальный коэффициент полезного действия η_n , %	55
Номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi$, о.е.	0,6
Момент инерции на валу J , кг/м ²	0,000033

Таблица 2.
Параметры схемы замещения электродвигателя

Table 2.
Motor Equivalent Circuit Parameters

Параметр	Значение
Сопротивление статора r_1 , Ом	69,7754
Приведенное активное сопротивление ротора r_2' , Ом	112,6818
Индуктивность статора L_S , Гн	3,281
Индуктивность ротора L_R , Гн	3,315

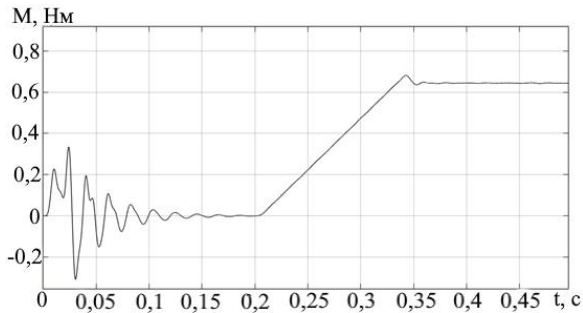


Рис. 3. Зависимость электромагнитного момента двигателя от времени при трехфазном питании

Fig. 3. The dependence of the motor electromagnetic moment on the time with three-phase power

Из рис. 3 видно, что пульсация момента, развиваемого двигателем, после разгона снижается практически до нуля. Момент двигателя, развиваемый под нагрузкой, равен 0,64 Нм.

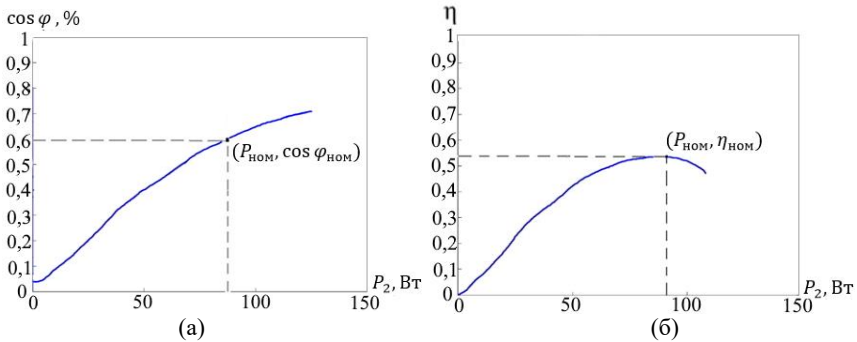


Рис. 4. Зависимость коэффициента мощности (а) и КПД (б) от мощности на валу двигателя

Fig. 4. The dependence of the power factor (a) and the efficiency (b) on the power on the motor shaft

Из графика на рис. 4, а, можно видеть, что коэффициент мощности электродвигателя растет при увеличении мощности на валу и достигает своего номинального значения $\cos \varphi = 0,6$ в момент достижения двигателем номинальной мощности. Из рис. 4, б видно, что КПД электродвигателя растет при увеличении мощности на валу и достигает своего номинального значения $\eta = 0,55$, которое является также максимальным в момент достижения двигателем номинальной мощности.

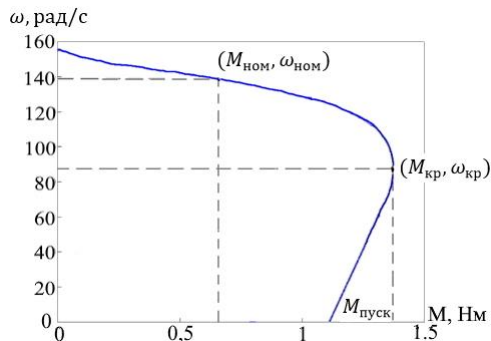


Рис. 5. Механическая характеристика, полученная в Matlab Simulink

Fig. 5. The mechanical characteristics obtained in Matlab Simulink

Из рис. 5 видно, что при номинальной нагрузке угловая скорость электродвигателя равна 1300 об/мин. Пусковой момент равен 1,1 Нм, критический – 1,4 Нм.

III. Моделирование характеристик электродвигателя при работе с частотным преобразователем

Для моделирования работы трехфазного асинхронного электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа было выбрано реверсивное полупроводниковое устройство регулирования скорости трехфазного асинхронного электродвигателя [6]. Принципиальная электрическая схема устройства изображена на рис. 6.

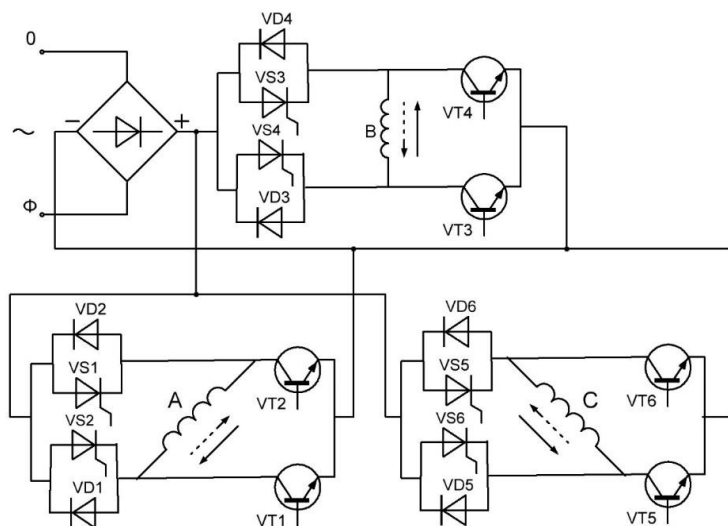


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема реверсивного полупроводникового устройства регулирования скорости трехфазного асинхронного электродвигателя

Fig. 6. Schematic diagram of a reversible semiconductor device for controlling the speed of a three-phase asynchronous electric motor

Данный преобразователь векторно-алгоритмического типа позволяет создавать три типа вращающегося поля статора путем последовательной смены четырех, шести или восьми фиксированных положений вектора магнитного потока. Для этого на транзисторы и тиристоры в схеме подаются управляющие сигналы по строго определенному алгоритму. Последовательность подачи сигналов на полупроводниковые элементы для вращающегося поля, которое состоит из шести фиксированных положений вектора

магнитного потока, представлено в табл. 3. Разделим период вращения поля на шесть равных промежутков времени. Прямое протекание тока по обмоткам статора двигателя на рисунке показано сплошной стрелкой, обратное – пунктирной. Первая, вторая и третья обмотка обозначены соответственно *A*, *B* и *C*.

Таблица 3.
Последовательность подачи сигналов на полупроводниковые элементы

Table 3.
The sequence of applying signals to semiconductor elements

Промежуток времени	Транзисторы						Направление тока в обмотке		
	VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6			
	Тиристоры						<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6				
1		О		О		О	–	+	–
2		О		О	О		–	+	+
3		О	О		О		–	–	+
4	О		О		О		+	–	+
5	О		О			О	+	–	–
6	О			О		О	+	+	–

Примечание: О – открытое положение элемента;

«+» – прямое направление протекания тока; «–» – обратное направление

На рис. 7 представлена модель схемы управления двигателем реверсивного полупроводникового устройства регулирования скорости трехфазного асинхронного электродвигателя. При моделировании были использованы блоки импульсных генераторов *G1-G6*, посредством которых управляются транзисторы. Настройка блока генератора происходит в соответствии с заданным алгоритмом работы преобразователя частоты.

Блок *DC Voltage Source* является источником постоянного напряжения. Данный блок был использован с целью упрощения модели, при этом не теряя достоверности полученных данных. С блока напряжение подается на *VT1-VT6* и *VS1-VS6*, которые представляют собой модели и эмитируют работу реальных полупроводниковых устройств. Транзистор моделируется при помощи сопротивления R_{om} и ключа *SW*, которые соединены последовательно. Состояние ключа контролируется блоком логики – при единичном положительном сигнале ключ включается, при нулевом – выключается. Сигнал на логический вход подают импульсные генераторы *G1-G6* в соответствии с заданным алгоритмом. В модели ключа параллельно силовым выводам подключена последовательная *RC*-цепь, выполняющая сглаживающие функции.

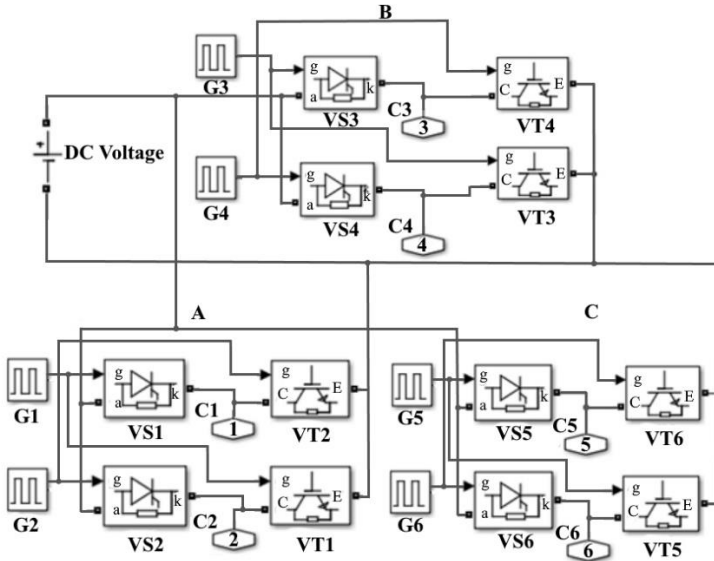


Рис. 7. Схема модели преобразователя векторно-алгоритмического типа

Fig. 7. Vector-algorithmic type converter model diagram

Блоки VT1-VT6, VS1-VS6, обмотки C1-C6 соединены согласно принципиальной электрической схеме преобразователя векторно-алгоритмического типа, изображенной на рис. 6. Для наглядности вся система свернута в один блок, который подключается к системе моделирования двигателя. Схема снятия характеристик электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа изображена на рис. 8.

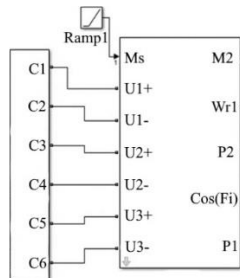


Рис. 8. Схема снятия характеристик электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа в среде *Matlab Simulink*

Fig. 8. Scheme for characterizing an electric motor with a vector-algorithmic type converter in a *Matlab Simulink* environment

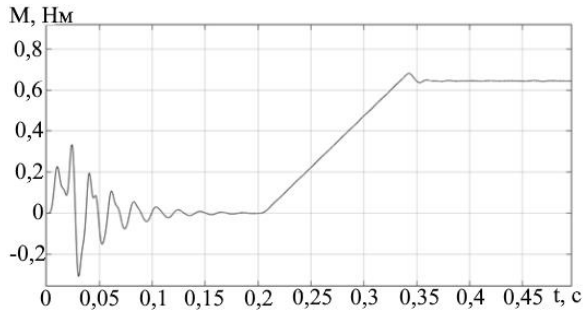


Рис. 9. Зависимость электромагнитного момента от времени для двигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа

Fig. 9. The dependence of the electromagnetic moment on time for an engine with a vector-algorithmic type converter

Из рис. 9 видно, что зависимость электромагнитного момента от времени для двигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа практически идентична зависимости момента двигателя от времени при питании от трехфазной сети.

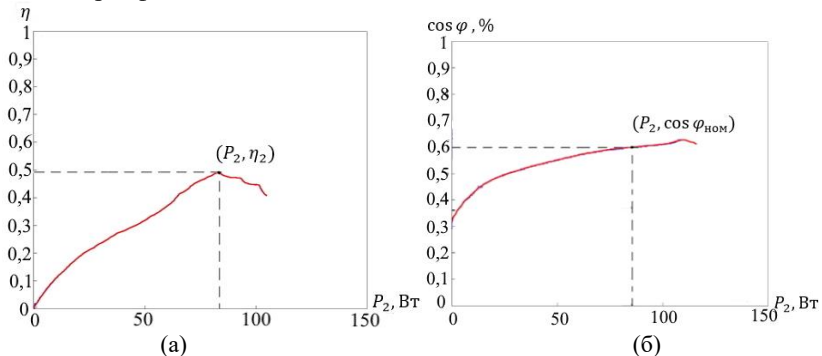


Рис. 10. Зависимость КПД (а) и коэффициента мощности (б) от мощности на валу электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа

Fig. 10. The dependence of the efficiency (a) and power factor (б) on the power on the motor shaft with a vector-algorithm type converter

Из графика, представленного на рис. 10, а, видно, что КПД электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа при номинальной мощности равен примерно 49 %.

Из рис. 10, б видно, что коэффициент мощности при работе электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа в разные промежутки времени остается близким к линейному при увеличении мощности на валу.

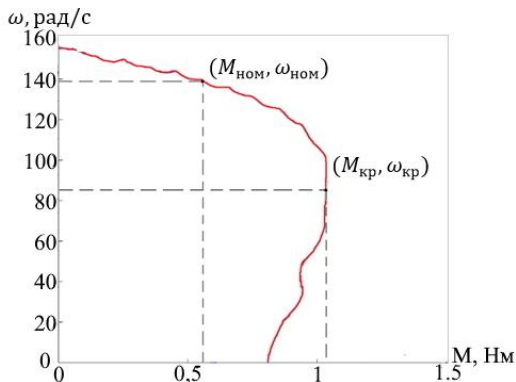


Рис. 11. График зависимости скорости от момента на валу электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа

Fig. 11. The graph of the dependence of speed on torque on the motor shaft with a vector-algorithmic type converter

Из рис. 11 видно, что пусковой момент электродвигателя равен $M_n \approx 0,8$ Нм, критический момент равен $M_{кр} \approx 1,0$ Нм, что практически совпадает с показателями, полученными при моделировании работы асинхронного двигателя от трехфазной сети.

Для сравнительной оценки результатов моделирования работы асинхронного электродвигателя от трехфазной сети и с преобразователем векторно-алгоритмического типа полученные при моделировании графики (рис. 4, 5 и 10, 11) были сопоставлены друг с другом. Сравнения рис. 4, а и 10, а показывает, что КПД двигателя при работе от трехфазной сети незначительно выше, чем при работе с преобразователем векторно-алгоритмического типа. Это объясняется появлением высокочастотных составляющих, а также тем, что по статорным обмоткам протекают несинусоидальные токи. При мощностях на валу выше номинальных, КПД двигателя снижается, что объясняется ростом переменных потерь при значениях тока выше номинального.

Из рис. 4, б и 10, б видно, что коэффициент мощности электродвигателя меньше, чем коэффициент мощности электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа при мощностях ниже номинальных.

Сравнение рис. 5 и 11 показывает, что пусковой момент электродвигателя при работе от трехфазной сети переменного тока равен $M_{\text{пуск1}} \approx 1,1$ Нм, критический момент $M_{\text{кр1}} \approx 1,4$ Нм. Пусковой момент двигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа равен $M_{\text{п2}} \approx 0,78$ Нм, критический момент $M_{\text{кр2}} \approx 1,05$ Нм.

IV. Выводы

В результате проведенных исследований с использованием средств компьютерного имитационного моделирования установлено, что трехфазный двигатель, управление которым происходит посредством преобразователя векторно-алгоритмического типа может нормально работать с номинальным моментом, а перегрузочная способность электродвигателя снижается незначительно. При этом необходимо отметить, что скорость двигателя и, как следствие, производительность механизма, использующего данный способ питания, снижается незначительно. КПД электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа при номинальной мощности достигает 49 %, что близко к значению 55 % при работе от трехфазной сети. Пусковой момент электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа равен $M_{\text{п2}} \approx 0.78$ Нм, что составляет 71 % от пускового момента $M_{\text{пуск1}} \approx 1.1$ Нм электродвигателя при работе от трехфазной сети.

Таким образом, применение исследуемого привода с использованием преобразователя векторно-алгоритмического типа является обоснованным и целесообразным при отсутствии трехфазной питающей сети.

© Еремочкин С.Ю., 2023

© Дорохов Д.В., 2023

Поступила в редакцию 04.09.2022

Received 04.09.2022

Библиографический список

- [1] Однокопылов Г.И., Букреев В.Г., Розаев И.А. Исследование отказоустойчивого вентильно-индукторного электродвигателя насоса для добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 10. С. 69-81. DOI: 10.18799/24131830/2019/10/2299
- [2] Чернышева Т.А., Журиков С.А., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Асинхронный электропривод каротажных подъемников визуального контроля технического состояния скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 12. С. 26-34.
- [3] Trianni A., Cagno E., Accordini D. A review of energy efficiency measures within electric motors systems // Energy Procedia. 2019. Vol. 158. P. 3346-3351. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.964

- [4] Errouha M., Derouich A., Motahhir S., Zamzoum O., Ouanjli N., Ghzizal A. Optimization and control of water pumping PV systems using fuzzy logic controller // *Energy Reports*. 2019. Vol. 5. P. 853-865. DOI: 10.1016/j.egy.2019.07.001
- [5] Mehazzem F., Nemmour A., Reama A. Real time implementation of backstepping-multiscalar control to induction motor fed by voltage source inverter // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. № 42 (28). P. 17965-17975. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.05.035
- [6] Стальная М.И., Еремочкин С.Ю., Королев Д.А., Титова А.А. Реверсивное полупроводниковое устройство регулирования скорости трехфазного асинхронного электродвигателя, Пат. 2622394 RU, заявл. 16.12.15; опубл. 15.06.17. – Бюл. № 17.
- [7] Vijetha Inti V.V., Vakula V.S. Design and MATLAB/Simulink implementation of four switch inverter for microgrid utilities // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 117. P. 615-625. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.05.159
- [8] Singh B., Agrawal G. Enhancement of voltage profile by incorporation of SVC in power system networks by using optimal load flow method in MATLAB/Simulink environments // *Energy Reports*. 2014. Vol. 4. P. 418-434. DOI: 10.1016/j.egy.2018.07.004
- [9] Abdin Z., Webb C.J., MacA. Gray E. One-dimensional metal-hydride tank model and simulation in Matlab-Simulink // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. № 43 (10). P. 5048-5067. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.100
- [10] Hur S. Modelling and control of a wind turbine and farm // *Energy*. 2018. № 156. P. 360-370. DOI: 10.1016/j.energy.2018.05.071
- [11] El-Kharashi E., Massoud J.G., Al-Ahmar M.A. The impact of the unbalance in both the voltage and the frequency on the performance of single and cascaded induction motors // *Energy*. 2019. Vol. 181. P. 561-575. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.169
- [12] Bholra M., Kumar N., Ghoshal S.K. Reducing fuel consumption of Front End Loader using regenerative hydro-static drive configuration-an experimental study // *Energy*. 2018. Vol. 162. P. 158-170. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.006
- [13] Tang X., Zhang D., Liu T., Khajepour A., Yu H., Wang H. Research on the energy control of a dual-motor hybrid vehicle during engine start-stop process // *Energy*. 2019. Vol. 166. P. 1181-1193. DOI: 1016/j.energy.2018.10.130
- [14] Wu G., Yang J., Shang J., Fang D. A rotary fluid power converter for improving energy efficiency of hydraulic system with variable load // *Energy*. 2020. Vol. 195. P. 116957. DOI: 10.1016/j.energy.2020.116957
- [15] Ahmed A., Yelamali P., Udayakumar R. Modelling and simulation of hybrid technology in vehicles // *Energy Reports*. 2020. Vol. 6. P. 589-594. DOI: 10.1016/j.egy.2019.11.123
- [16] Стальная М.И., Еремочкин С.Ю. Создание универсальной модели трехфазного электродвигателя с преобразователем векторно-алгоритмического типа в среде *MATLAB SIMULINK* // XVI Межд. науч.-тех. конф. «Электроприводы переменного тока», Октябрь 05-09, 2015, Екатеринбург, Россия: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2015. С. 149-152.

References

- [1] G.I. Odnokopylov, V.G. Bukreev and I.A. Rozaev, "Research of fault-tolerant switched-reluctance motor of electrical oil pump", *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*, vol. 330, no. 10, pp. 69-81, 2019. DOI: 10.18799/24131830/2019/10/2299
- [2] T.A. Chernysheva, S.A. Zhurikov, A.Yu. Chernyshev and I.A. Chernyshev, "Asinhronnyj elektroprivod karotazhnyh pod"emnikov vizual'nogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya skvazhin [Asynchronous electric drive for logging hoists for visual control of the technical condition of wells]", *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources]*, vol. 327, no. 12, pp. 26-34, 2016 (in Russian).
- [3] A. Trianni, E. Cagno and D. Accordini, "A review of energy efficiency measures within electric motors systems", *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 3346-3351, 2019. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.964
- [4] M. Errouha, A. Derouich, S. Motahhir, O. Zamzoum, N. Ouanjli and A. Ghzizal, "Optimization and control of water pumping PV systems using fuzzy logic controller", *Energy Reports*, vol. 5, pp. 853-865, 2019. DOI: 10.1016/j.egypr.2019.07.001
- [5] F. Mehazzem, A. Nemmour and A. Reama, "Real time implementation of backstepping-multiscalar control to induction motor fed by voltage source inverter", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 28, pp. 17965-17975, 2017. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.05.035
- [6] M.I. Stalnaya, S.Y. Eremochkin, D.A. Korolev and A.A. Titova, "Reversivnoe poluprovodnikovoe ustrojstvo regulirovaniya skorosti trekhfaznogo asinhronnogo elektrodvigatelya [Reversible semiconductor device for speed control of a three-phase asynchronous electric motor]", Patent RU 2622394, Jun. 15, 2017 (in Russian).
- [7] V.V. Vijetha Inti and V.S. Vakula, "Design and MATLAB/Simulink implementation of four switch inverter for microgrid utilities", *Energy Procedia*, vol. 117, pp. 615-625, 2017. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.05.159
- [8] B. Singh and G. Agrawal, "Enhancement of voltage profile by incorporation of SVC in power system networks by using optimal load flow method in MATLAB/Simulink environments", *Energy Reports*, vol. 4, pp. 418-434, 2018. DOI: 10.1016/j.egypr.2018.07.004
- [9] Z. Abdin, C.J. Webb and E. MacA. Gray, "One-dimensional metal-hydride tank model and simulation in Matlab-Simulink", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 10, pp. 5048-5067, 2018. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.100
- [10] S. Hur, "Modelling and control of a wind turbine and farm", *Energy*, vol. 156, pp. 360-370, 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2018.05.071
- [11] E. El-Kharashi, J.G. Massoud and M.A. Al-Ahmar, "The impact of the unbalance in both the voltage and the frequency on the performance of single and cascaded induction motors", *Energy*, vol. 181, pp. 561-575, 2019. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.169
- [12] M. Bhola, N. Kumar and S.K. Ghoshal, "Reducing fuel consumption of front end loader using regenerative hydro-static drive configuration-an experimental study", *Energy*, vol. 162, pp. 158-170, 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.006

- [13] X. Tang, D. Zhang, T. Liu, A. Khajepour, H. Yu and H. Wang, "Research on the energy control of a dual-motor hybrid vehicle during engine start-stop process", *Energy*, vol. 166, pp. 1181-1193, 2019. DOI: 10.1016/j.energy.2018.10.130
- [14] G. Wu, J. Yang, J. Shang and D. Fang, "A rotary fluid power converter for improving energy efficiency of hydraulic system with variable load", *Energy*, vol. 195, pp. 116957, 2020. DOI: 10.1016/j.energy.2020.116957
- [15] A. Ahmed, P. Yelamali and R. Udayakumar, "Modelling and simulation of hybrid technology in vehicles", *Energy Reports*, vol. 6, pp. 589-594, 2020. DOI: 10.1016/j.egy.2019.11.123
- [16] M.I. Stalnaya and S.Yu. Eremochkin, "Creation of universal model of the three phase electric motor with vector algorithmic converter in the MATLAB SIMULINK, in proc. XVI Int. sci.-tech. conf. "AC electric drives", Oct. 05-09, 2015, Yekaterinburg, Russia, pp. 149-152.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Еремочкин Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Российская Федерация.

Sergey Y. Eremochkin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation.

Дорохов Данил Валерьевич, студент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Российская Федерация.

Danil V. Dorokhov, student of the Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation.

УДК 621.03.07

DOI 10.46960/2658-6754_2023_1_38

УМЕНЬШЕНИЕ РАЗМАХА ПУЛЬСАЦИЙ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДВОЙНОЙ ИНВЕРТОРНОЙ СИСТЕМЫ В СОСТАВЕ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ НИЗКИХ СКОРОСТЯХ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА

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.С. Плехов

ORCID: 0000-0002-6954-3295 e-mail: apleshov@mail.ru

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

В.Г. Титов

ORCID: 0000-0001-9268-4902 e-mail: eos@nntu.ru

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

И.В. Кольчик

ORCID: 0009-0009-5617-3174 e-mail: irak116@mail.ru

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

Цель данной работы – дополнительное снижение размаха пульсаций при низких скоростях вращения вала шагового электродвигателя (ШД), путем регулирования напряжения конденсаторов звеньев постоянного тока дополнительных инверторов. Применение двойной инверторной системы позволяет снизить размах пульсаций выходного напряжения преобразователя, потери в силовых полупроводниковых элементах, увеличить диапазон регулирования по скорости при меньшем напряжении питания. Для достижения поставленной цели разработана система управления, вычисляющая значение напряжения конденсаторов дополнительных инверторов, необходимое для работы электропривода при текущем значении скорости и заданного электромагнитного момента и содержащая в себе алгоритм коммутации силовых ключей, основанный на таблице поиска и осуществляющий выбор наиболее подходящей конфигурации включенных силовых полупроводниковых элементов инверторной системы при текущем уровне заряда конденсатора дополнительных инверторов, токе фазы ШД и требуемом мгновенном уровне выходного напряжения.

Ключевые слова: автономные инверторы напряжения, векторное управление, двойная инверторная система, мостовой преобразователь, сдвоенные инверторы напряжения, шаговый электродвигатель.

Для цитирования: Абузяров Т.Х., Плехов А.С., Титов В.Г., Кольчик И.В. Уменьшение размаха пульсаций выходного напряжения двойной инверторной системы в составе шагового электропривода при низких скоростях вращения вала // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 1. С. 38-50.

DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_38

REDUCTION OF OUTPUT VOLTAGE RIPPLE OF DUAL INVERTER-FED STEPPER DRIVE AT LOW SPEED

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.S. Plekhov

ORCID: **0000-0002-6954-3295** e-mail: **aplehov@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

V.G. Titov

ORCID: **0000-0001-9268-4902** e-mail: **eos@nntu.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

I.V. Kolchik

ORCID: **0009-0009-5617-3174** e-mail: **irak116@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. At present, a bridge circuit for connecting power elements is widely used for bipolar control of stepper motors (SM). Among the disadvantages of this solution, one can note a small range of speeds achievable at a fixed load of a stepper electric drive, a high range of phase voltage ripples and, as a result, high dynamic losses in the semiconductor converter, as well as a high range of ripples of the moment generated by the electric drive. These features, as well as a significant value of the reactive component of the power consumed by the stepper motor at high shaft speeds, indicate the feasibility of sequential inclusion of auxiliary inverters in the classical converter system (one for each phase of the electric motor), compensating for the consumed reactive stepper motor energy, which is confirmed by previous studies. The use of a double inverter system makes it possible to

reduce the ripple range of the output voltage of the converter, losses in power semiconductor elements, and increase the range of speed control at a lower supply voltage. The purpose of this work is to additionally reduce the range of ripples at low speeds of rotation of the SM shaft by regulating the voltage of the capacitors of the DC links of auxiliary inverters. To achieve this goal, a control system has been developed that calculates the voltage value of the capacitors of auxiliary inverters, which is necessary for the operation of the electric drive at the current value of speed and a given electromagnetic torque. The designed control system also contains an algorithm for switching power transistors based on a lookup table and selecting the most appropriate configuration of the enabled power semiconductor elements of the inverter system at the current charge level of the capacitor of auxiliary inverters, the phase current of the stepper motor and the required instantaneous output voltage level.

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

For citation: T.Kh. Abuzyarov, A.S. Plekhov and V.G. Titov, I.V. Kolchik “Reduction of output voltage ripple of dual inverter-fed stepper drive at low speed”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 38-50, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_38

I. Введение

Электропривод на основе шаговых электродвигателей (ШД) применяется в бытовой технике, станках с числовым программным управлением, системах позиционирования роботов, актуаторах космических аппаратов и т.д. Широкое применение такого электропривода обусловлено его низкой стоимостью, высокой надежностью, а также простотой организации системы управления [1-2].

Применение мостового инвертора напряжения является наиболее распространенным схемным решением силовой части преобразователя при организации биполярного управления током фаз гибридных ШД. Высокий размах пульсаций схемы, равный напряжению питания, вкуче с необходимостью применения относительно высоких частот коммутации силовых ключей для обеспечения заданного значения тока фазы ШД, вызывает высокий уровень динамических потерь в преобразователе. С другой стороны, характерный для данного типа электродвигателей рост индуктивного сопротивления фазы при средних и высоких скоростях вращения вала значительно ограничивает диапазон регулирования по скорости системы электропривода. Увеличение диапазона регулирования путем увеличения напряжения питания преобразователя требует повышать и частоту широтно-импульсной модуляции силовых ключей для поддержания заданного уровня пульсаций фазного тока электродвигателей, что, в конечном счете, дополнительно увеличивает динамические потери в преобразователе.

Интенсивное развитие силовой полупроводниковой техники открывает новые возможности в сфере исследований систем электропривода с нестандартной схемой силовой преобразовательной части [3-9]. Так, например, в [4-11] исследуется перспективная схема силовой части электропривода на основе электрической машины с разомкнутыми обмотками, питаемой от преобразовательной системы, состоящей из последовательно соединенных мостовых инверторов, использующих независимые источники питания для соответствующих звеньев постоянного тока. Более того, в подобных системах один из инверторов (назовем его дополнительным) может работать и без источника питания в звене постоянного тока [9-11], компенсируя реактивную энергию электрической машины. Преимуществами таких систем по сравнению с классической схемой преобразовательной части является увеличенный диапазон скоростей вращения вала электродвигателя, повышенная отказоустойчивость, сниженные динамические потери преобразователя.

Данное исследование является продолжением [11] и посвящено синтезу системы управления двойной инверторной системой, обеспечивающей дополнительное снижение размаха пульсаций выходного напряжения преобразователя при низких скоростях вращения вала электродвигателя путем регулирования напряжения конденсаторов звена постоянного тока дополнительных инверторов.

II. Структура электропривода и алгоритм работы

Силовая часть исследуемого преобразователя для питания двухфазного ШД приведена на рис. 1.

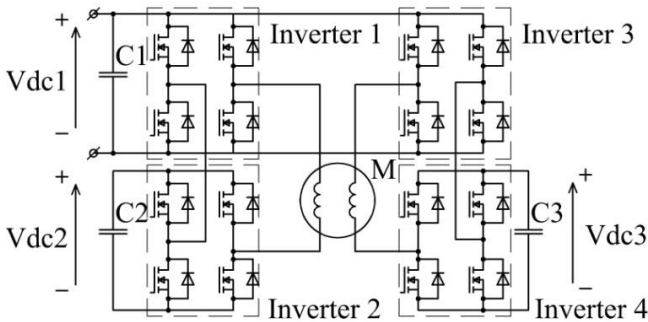


Рис. 1. Силовая часть исследуемой инверторной системы

Fig. 1. The proposed dual inverter power circuit

Схема содержит четыре полномостовых инвертора ИН1–ИН4 – по два на каждую фазу электродвигателя. Звено постоянного тока основных

инверторов ИН1 и ИН3 подключено к источнику питания, тогда как к звеньям постоянного тока дополнительных инверторов ИН2 и ИН4 подключены только конденсаторы С2 и С3 соответственно. Инверторы ИН1 и ИН2 соединены последовательно с одной из обмоток ШД, их генерируемые напряжения складываются; аналогично – для инверторов ИН3 и ИН4.

Для управления двойной инверторной системой предлагается использовать принцип векторного управления синхронным электродвигателем, дополненного рядом разработанных с учетом особенностей силовой части преобразователя функциональных блоков. Функциональная схема предлагаемой системы управления представлена на рис. 2.

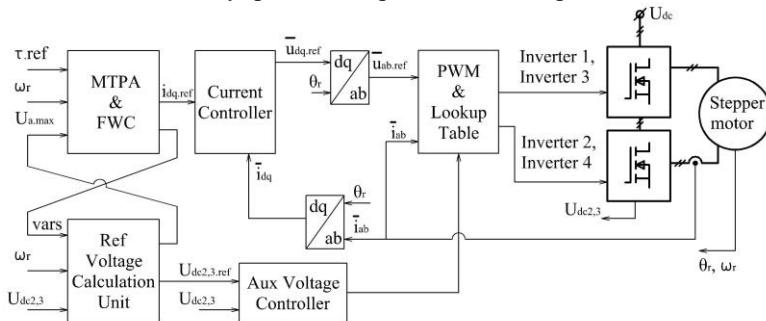


Рис. 2. Функциональная схема системы управления преобразователем

Fig. 2. The proposed dual inverter functional scheme

Блок «MTPA & FWC» (от англ. «Maximum Torque Per Ampere & Field-Weakening Controller») принимает значения момента задания, фактической скорости вращения вала электродвигателя, а также вычисленное максимально возможное значение амплитуды первой гармоники выходного напряжения двойного преобразователя при заданных параметрах электродвигателя и его текущего режима работы. Результатом работы блока является ток задания статора во вращающейся системе координат dq .

Блок расчета напряжений «Ref Voltage Calculation Unit» выполняет две функции:

- расчет максимально возможной амплитуды первой гармоники выходного напряжения двойной инверторной системы при текущем режиме работы электропривода;
- расчет минимального напряжения звена постоянного тока дополнительных инверторов в интервале от $0,5U_{DC}$ до U_{DC} (напряжение источника питания), достаточного для работы преобразователя на заданной скорости ШД с целью обеспечения минимального размаха пульсаций выходного напряжения.

Блок «Aux Voltage Controller» осуществляет регулирование напряжения звеньев постоянного тока дополнительных инверторов ИН2 и ИН4 путем сравнения заданных и измеренных величин и генерации соответствующих сигналов для блока «PWM & Lookup table».

Рассмотрим процесс расчета необходимого напряжения конденсатора звена постоянного тока дополнительных инверторов ИН2 и ИН4.

Выходное напряжение исследуемого инвертора в предлагаемой системе управления формируется согласно следующим принципам (в порядке возрастания приоритета):

- потреблять дополнительным инвертором максимум энергии, когда это возможно;
- минимизировать размах пульсаций выходного напряжения;
- минимизировать количество коммутаций силовых ключей преобразователя.

На рис. 3 изображен график гладких составляющих напряжений на обмотке статора ШД $u(t)$, а также основного и дополнительного инверторов двойной инверторной системы $u_1(t)$ и $u_2(t)$ соответственно.

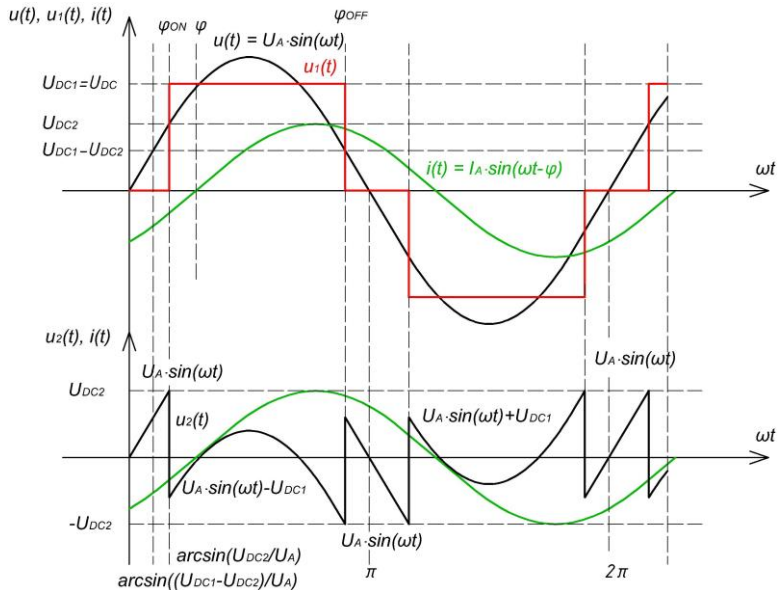


Рис. 3. Графики выходных напряжений и тока двойной инверторной системы

Fig. 3. Output current and voltages of the proposed dual inverter

Поскольку входное напряжение дополнительных инверторов в рассматриваемой ситуации ниже входного напряжения основных, ШИМ ключей дополнительных инверторов будет обеспечивать минимально возможный размах пульсаций выходного напряжения, при этом основные инверторы формируют выходное напряжение без ШИМ.

Энергия, накопленная в конденсаторе дополнительного инвертора ΔE , Дж, за период основной гармоники:

$$\Delta E = \int_0^{2\pi} u_2(\omega t) i(\omega t) d\omega t, \quad (1)$$

где $i(\omega t)$ – ток фазы статора ШД, А, изменяющийся по синусоидальному закону.

Напряжение дополнительного инвертора $u_2(\omega t)$, В:

$$u_2(\omega t) = u(\omega t) - u_1(\omega t) = \begin{cases} U_a \sin(\omega t), & 0 \leq \omega t < \phi_{ON} \\ U_a \sin(\omega t) - U_{DC}, & \phi_{ON} \leq \omega t < \phi_{OFF} \\ U_a \sin(\omega t), & \phi_{OFF} \leq \omega t < \pi + \phi_{ON} \\ U_a \sin(\omega t) + U_{DC}, & \pi + \phi_{ON} \leq \omega t \leq \pi + \phi_{OFF} \\ U_a \sin(\omega t), & \pi + \phi_{OFF} \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases}, \quad (2)$$

где ϕ – разность фаз, рад, между напряжением и током фазы статора; U_a – амплитуда фазного напряжения, В,

Подставив (2) в (1) и приравняв полученное выражение к нулю (входное напряжение дополнительного инвертора не должно меняться), получим:

$$\begin{aligned} \Delta E &= \int_0^{2\pi} u_2(\omega t) i(\omega t) d\omega t = \\ &= 2 \left[\int_{\phi_{OFF} - \pi}^{\phi_{ON}} I_a \sin(\omega t - \phi) \cdot U_a \sin(\omega t) d(\omega t) + \right. \\ &\left. + \int_{\phi_{ON}}^{\phi_{OFF}} I_a \sin(\omega t - \phi) \cdot (U_a \sin(\omega t) - U_{DC}) d(\omega t) \right] = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Взятие этого интеграла и последующие упрощения при различных соотношениях величин разницы фаз между напряжением и током фазы ϕ , напряжением питания U_{DC} , В, и напряжением звена постоянного тока дополнительного инвертора U_{DC2} , В, в результате изменения момента времени

включения основного инвертора φ_{ON} , рад, (рис. 3) приводят (3) к различным выражениям. Так, например, в ситуации, изображенной на рис. 3, при:

$$\varphi > \arcsin(U_{DC2} / U_a); \quad \varphi_{ON} = \arcsin\left(\frac{U_{DC2}}{U_a}\right), \quad (4)$$

и (3) может быть упрощено до вида:

$$\begin{aligned} & \sin(\varphi)(U_{DC1} - 2U_{DC2}) - \\ & - \cos(\varphi) \left[\sqrt{U_a^2 - (U_{DC1} - U_{DC2})^2} + \sqrt{U_a^2 - U_{DC2}^2} + \frac{\pi U_a^2}{2U_{DC1}} \right] = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Задание на необходимое напряжение звеньев постоянного тока дополнительных инверторов $U_{DC2.ref}$, В может быть рассчитано численным решением (5) относительно U_a . При этом U_a в указанном уравнении рассчитывается по формуле:

$$U_a = \sqrt{(Ri_d - p\omega i_q L_q)^2 + (Ri_q + p\omega i_d L_d + K\omega)^2}, \quad (6)$$

где R – сопротивление, Ом, обмоток статора ШД; i_d, i_q – токи, А, в системе координат dq рассчитанные согласно принципу МТПА; p – число пар эквивалентных полюсов ШД (конструктивная величина, обусловленная наличием зубцов, расположенных на основных полюсах статора, на которых расположены обмотки, и равная числу пар полюсов ротора ШД); ω – скорость вращения ротора, рад/с; L_d, L_q – индуктивности ШД, Гн, по продольной и поперечной оси; K – конструктивный коэффициент ШД, Н·м/А.

При напряжении звена постоянного тока дополнительных инверторов, находящихся в диапазоне от $0,5U_{DC}$ до U_{DC} , преобразователь может генерировать 9 различных уровней напряжения – по одному на каждую комбинацию возможных выходных напряжений основного и дополнительного инверторов. Для достижения поставленных задач генерации заданного выходного напряжения преобразователя и одновременного поддержания необходимого уровня напряжения звена постоянного тока при заданных ограничениях, предлагается применять таблицу поиска. В данной таблице, исходя из текущего значения сигнала регулятора напряжения, входящего модулирующего сигнала в диапазон изменения пилообразных несущих сигналов, а также сигнала с датчика тока фазы жесткой логикой выбирается наиболее предпочтительный канал несущих сигналов, который при сравнении с модулирующим сигналом образует новый заданный уровень выходного напряжения, которому соответствует единственная комбинация про-

водящих состояний ключей двойного инвертора. При этом приоритетно выбирается такой канал с массивом пилообразных напряжений, чтобы обеспечить ШИМ только одной транзисторной стойкой дополнительного инвертора.

III. Результаты моделирования

Для проверки работоспособности предложенного фрагмента системы управления преобразователем разработана модель данной системы в среде *Matlab/Simulink*, представленная на рис. 4.

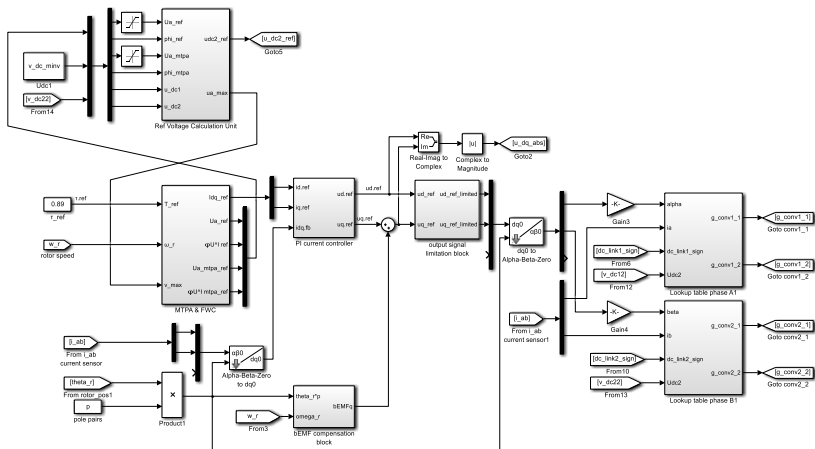


Рис. 4. Модель системы управления в среде Matlab/simulink

Fig. 4. Matlab/Simulink model structure

На рис. 5 представлен график зависимости минимально необходимого напряжения звена постоянного тока дополнительных инверторов ИН2 и ИН4 от скорости вращения вала электропривода при заданных параметрах серийной модели гибридного ШД и напряжении питания инверторной системы, равном 48 В. Данное задание ограничено величинами 26 В снизу (из соображений стабильности нахождения численного решения интеграла (3)) и 48 В сверху (напряжение питания преобразовательной системы). Из графика видно, что до скорости около 830 об/мин возможно дополнительное снижение размаха пульсаций фазного напряжения ШД практически в два раза, если совершать ШИМ исключительно дополнительным инвертором. График напряжения фазы ШД при работе на скорости 800 об/мин представлен на рис. 6. Параметры гибридного ШД представлены в табл. 1.

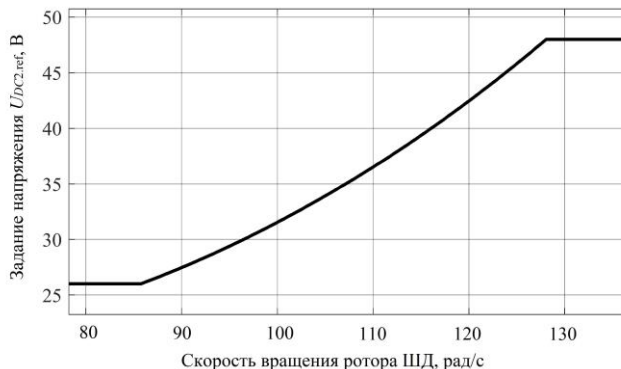


Рис. 5. Зависимость минимального необходимого напряжения U_{DC2} от скорости вращения ротора ШД

Fig. 5. Required level of the auxiliary inverter input voltage U_{DC2} vs. SM rotor speed

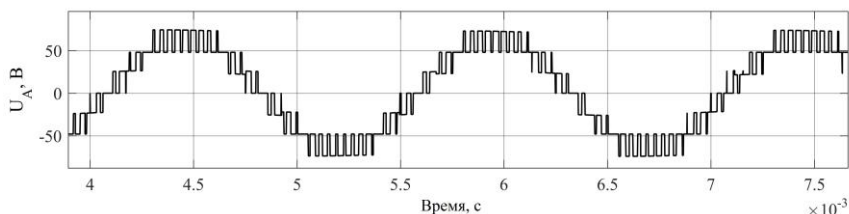


Рис. 6. График выходного напряжения двойной инверторной системы при скорости вала ШД, равной 800 об/мин

Fig. 6. Dual inverter output voltage when SM rotating speed equals 800 rpm

**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
Индуктивность по оси d , мГн	3,8
Индуктивность по оси q , мГн	4,2
Номинальный ток фазы, А	2,3
Масса, кг	0,47

IV. Заключение

Схемное решение двойной преобразовательной системы с единственным источником питания позволяет осуществлять регулирование напряжения звена постоянного тока дополнительных инверторов. Предложен способ расчета сигнала задания данного напряжения, а также структура системы управления, осуществляющей указанное регулирование.

Имитационное моделирование показало, что снижение данного напряжения до половины от напряжения питания инверторной системы позволяет в широком диапазоне скоростей работы электропривода в два раза сократить размах пульсаций выходного напряжения преобразователя и, поскольку только дополнительные инверторы работают в режиме ШИМ, в два раза снизить динамические потери в преобразователе.

© Абузьяров Т.Х., 2022

© Плехов А.С., 2022

© Титов В.Г., 2023

© Кольчик И.В., 2023

Поступила в редакцию 01.09.2023

Received 01.09.2023

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 algorithms // IEEE Industry Applications Magazine. 2014. Vol. 20. No. 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. Vol. 32. No. 9. P. 7244–7255. DOI 10.1109/TPEL.2016.2623341
- [3] Абузьяров 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. Vol. 2. No. 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 Trans. Industrial Electronics. 2002. Vol. 49. No. 4. P. 724–738. DOI: 10.1109/TIE.2002.801052
- [6] Loncarski J., Leijon M., Srndović 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] Абузаров Т.Х., Плехов А. С. Каскадный преобразователь для электротранспорта с пространственно-векторным управлением // материалы VI Всероссийской конф. «Актуальные проблемы электроэнергетики». 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 [Электронный ресурс] URL: <https://journal.ie.asm.md/ru/contents/elektronnyj-zhurnal-n-1-2006> (дата обращения 07.08.2022), № 1, 2006.
- [9] Chowdhury S., Wheeler P., Gerada C., Arevalo S.L. A dual inverter for an open end winding induction motor drive without an isolation transformer // 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2015, pp. 283–289. DOI: 10.1109/APEC.2015.7104364
- [10] Абузаров 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 // proc. 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 2021, pp. 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 and L. Vandeveldel, “The efficiency of hybrid stepping motors: analyzing the impact of control algorithms,” *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, Sept. 2017. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2623341
- [3] Abuziarov T.H., Plehov A.S., Dar’enkov A.B. and Ermolaev A.I. “Development of a high-quality brushless DC electric drive systems model”, *Vestnik IGEU*, 2020, no. 1, p. 31-45. 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, June 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. Srndović, 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, "Space vector control dual-inverter for an electric vehicle," in proc. *Aktualnyye problemy electroenergetiki [Actual problems of the electric power industry]*, 2020, pp. 41–47. DOI 10.46960/39255930_2020_41 (in Russian).
- [8] V. Oleschuk, A. Sizov, A. Stankovic and E. Yaroshenko, "Dual inverter-fed drives with the synchronised multilevel voltage waveforms", *Problemy regionalnoy energetiki [Problems of region electric power industry]*, no. 1, 2006. (In Russian).
- [9] S. Chowdhury, P. Wheeler, C. Gerada and S.L. 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)*, 2015, pp. 283–289. DOI: 10.1109/APEC.2015.7104364
- [10] T.H. Abuzyarov, "Dual-inverter feeding system for stepper motor drive with reduced DC link voltage", *Electrotechnical Systems and Complexes*, vol. 1(50), 2021, pp. 27–34. 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)*, 2021, pp. 1061-1065. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Абузыаров Тагир Хусайнович, аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, 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.

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

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

Кольчик Ирина Викторовна, кандидат педагогических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Irina V. Kolchik, Cand. Sci. (Ped.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

УДК 621.311:629.12

DOI 10.46960/2658-6754_2023_1_51

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С ВНЕШНЕЙ ФОРСИРОВКОЙ

В.Г. Сугаков

ORCID: 0000-0003-2712-7717 e-mail: kaf_eeovt@vsuwt.ru
Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия

О.С. Хватов

e-mail: khvatov_oleg@mail.ru
Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия

А.А. Тощев

ORCID: 0009-0004-3141-8917 e-mail: toshev_a@mail.ru
Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия

Л.В. Зобов

ORCID: 0000-0001-5133-0761 e-mail: zob-lavrik@yandex.ru
Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия

В статье рассматриваются существующие и перспективные системы автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов автономных источников электроэнергии. Проведен анализ существующих принципов регулирования возбуждения, в частности, регулирования по отклонению напряжения генератора, а также регулирования по возмущению. Приведены качественные аспекты регулирования напряжения в динамических режимах работы системы. По результатам анализа предложено использовать внешнюю форсировку возбуждения для улучшения качества регулирования. Приводятся структурные схемы и устройства внешней форсировки. Использование внешней форсировки уменьшает перерегулирование за счет частоты вычитания записываемых кодов мгновенных значений тока. Отмечается, что наибольшее приращение тока наблюдается в области перехода мгновенного значения тока через ноль. Предложен вариант устройства дозирования форсировки, который включается в состав управляемой внешней форсировки и оценивает величину приращения тока, и подает управляющий сигнал, соответствующий данному приращению, исключающий перерегулирование. Приведены статистические

результаты применения систем автоматического регулирования с внешней форсировкой по различным показателям качества электрической энергии. Сделан вывод об экономической эффективности применения данных систем.

Ключевые слова: внешняя форсировка, двунаправленная форсировка, неуправляемая форсировка, однонаправленная форсировка, приращение тока, регулирование возбуждения, сброс и наброс нагрузки, синхронный генератор, управляемая форсировка.

Для цитирования: Сугаков В.Г., Хватов О.С., Тоцев А.А., Зобов Л.В. Системы автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов автономных источников электроэнергии с внешней форсировкой // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 1. С. 51-61. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_51

AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR EXCITATION OF SYNCHRONOUS GENERATORS OF AUTONOMOUS POWER SOURCES WITH EXTERNAL BOOST

V.G. Sugakov

ORCID: **0000-0003-2712-7717** e-mail: **kaf_eeovt@vsuwt.ru**
Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia

O.S. Khvatov

e-mail: **khvatov_oleg@mail.ru**
Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Toshchev

ORCID: **0009-0004-3141-8917** e-mail: **toshev_a@mail.ru**
Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia

L.V. Zobov

ORCID: **0000-0001-5133-0761** e-mail: **zob-lavrik@yandex.ru**
Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article discusses the existing and promising systems of automatic excitation control of synchronous generators of autonomous power sources. The analysis of the existing principles of excitation regulation, in particular the regulation of the voltage deviation of the generator, as well as the regulation of perturbation. Qualitative aspects of voltage regulation in dynamic operating modes of the system are described. According to

the results of the analysis, an external excitation boost is proposed to use to improve the quality of regulation. Structural schemes of external forcing and external forcing devices are presented. The use of external forcing reduces overshoot due to the frequency of subtraction of the recorded codes of instantaneous current values. It is noted that the largest increment of current is observed in the region of the transition of the instantaneous current value through zero. It is an identification and is used by the launching bodies of the proposed system to launch an external boost. A variant of the boost metering device is suggested. This device is included in the controlled external boost and evaluates the value of the current increment, and gives a control signal corresponding to this increment, eliminating overshoot. The article presents statistical results of the use of automatic control systems with external forcing on various indicators of the quality of electrical energy, as well as reflects that the use of these systems can increase economic efficiency by eliminating the use of soft-start devices.

Keywords: bidirectional boost, controlled boost, current increment, excitation control, external boost, load shedding and boost, synchronous generator, uncontrolled boost, unidirectional boost.

For citation: V.G. Sugakov, O.S. Khvatov, A.A. Toshchev and L.V. Zobov, "Automatic control systems for excitation of synchronous generators of autonomous power sources with external boost", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 51-61, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_51

I. Введение

В настоящее время расширяется использование автономных источников электроэнергии (АИЭ), причем как в качестве основного источника для электропитания автономных объектов, так и в качестве резервных источников для повышения надежности электроснабжения. К числу АИЭ, в частности, относятся электроагрегаты (ЭА) с приводом от двигателей внутреннего сгорания [1], которые входят в состав передвижных [2, 3] и судовых электростанций. АИЭ характеризуются относительно небольшими мощностями, чем объясняются значительные отклонения напряжений при изменении величины и характера нагрузки. Поэтому остаются актуальными вопросы, связанные с регулированием возбуждения синхронных генераторов (СГ), входящих в состав АИЭ.

II. Материалы и методы

Для автоматического регулирования возбуждения СГ используются системы автоматического регулирования возбуждения (САРВ), реализующие различные принципы регулирования. Под принципом автоматического регулирования понимается закон формирования управляющего воздействия в системе, который зависит от того, используется ли для выработки управляющего закона причина (возмущение), вызывающая нарушение состояния объекта, или следствие (отклонение) как результат проявления этой

причины. Поэтому различают три принципа регулирования: по отклонению, по возмущению и комбинированный.

САРВ с регулированием по отклонению напряжения генератора, имеющие автоматические регуляторы напряжения (АРН), по своей структуре являются замкнутыми. В них для формирования регулирующего воздействия $y(t)$ используется информация о действительном значении регулируемой величины $u(t)$. Схема такой системы представлена на рис. 1, а. Автоматическое регулирующее устройство (АРУ) измеряет текущее значение напряжения $u(t)$. Затем оно сравнивает его с заданным уровнем напряжения $q(t)$ и определяет величину и знак ошибки управления $\varepsilon(t) = q(t) - u(t)$. В результате АРУ формирует регулирующее воздействие $y(t)$ на генератор (объект регулирования ОП), чтобы минимизировать эту ошибку. Цепь, по которой информация о текущем значении величины $u(t)$ передается с выхода объекта регулирования на выход АРУ с обратным знаком, называют главной отрицательной обратной связью (ГООС) автоматической системы.

Основным достоинством замкнутой САРВ является универсальность, которая выражается в том, что любое отклонение $u(t)$ от заданного значения $q(t)$, независимо от причины его возникновения $f(t)$, вызывает регулирующее воздействие $y(t)$, направленное на ликвидацию отклонения.

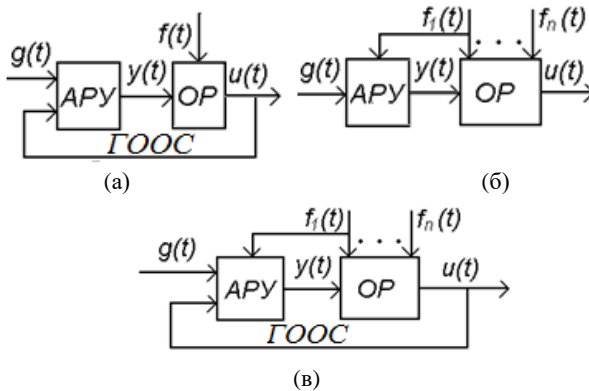


Рис. 1. Структурные схемы систем автоматического регулирования возбуждения: САРВ с регулированием по отклонению (а); САРВ с регулированием по возмущению (б); комбинированная САРВ (в)

Fig. 1. Structural diagrams of automatic excitation control systems: SAEC with deviation control (a); SAEC with disturbance control (б); combined SAEC (в)

Это особенно важно, когда объект регулирования подвержен влиянию многочисленных возмущающих воздействий (величина и характер

тока нагрузки, неравномерность частоты вращения ротора генератора, температура окружающей среды, степень прогрева элементов схемы и т.д.) САРВ по отклонению имеет высокую точность, однако их быстродействие невысоко, что обусловлено принципиальной необходимостью появления отклонения (ошибки) [4], лишь после возникновения которого начинает формироваться регулирующее воздействие. Импульсные АРН используются в САРВ генераторов типа ГАБ, ГА и др.

САРВ с регулированием по возмущению (рис. 1, б) называют системами компаундирования. Под компаундированием понимается суммирование постоянной и переменной составляющих возбуждения [5]. Постоянная составляющая пропорциональна напряжению генератора. Она обеспечивает возбуждение генератора на холостом ходу. Переменная (компаундирующая) составляющая пропорциональна току нагрузки и обеспечивает компенсацию потоков рассеивания и действия реакции якоря генератора. Физическая природа составляющих может быть различной: токи, напряжения, магнитные потоки, МДС и т.д. Способ сложения составляющих возбуждения определяет возможности САРВ по учету характера нагрузки. При векторном (геометрическом) сложении составляющих учитывается характер нагрузки, и такое компаундирование считается фазовым (амплитудно-фазовым). Алгебраическое сложение составляющих не позволяет учитывать характер нагрузки, и такое компаундирование называют токовым.

Если осуществляется суммирование составляющих возбуждения генератора, то компаундирование называют прямым, а если складываются составляющих возбуждения возбудителя генератора, то косвенным.

Системы компаундирования являются разомкнутыми, так как отсутствует ГООС, соединяющая выход объекта регулирования (ОР) с входом автоматического регулирующего устройства (АРУ). Регулирующее воздействие $y(t)$ вырабатывается на основе измерения главного возмущения $f_1(t)$, которым служит ток якоря генератора. Преимуществом разомкнутых систем является быстродействие, поскольку информация о возмущающем воздействии поступает в АРУ раньше, чем возникнет вызванное возмущением $f_1(t)$ отклонение. Это приводит к уменьшению отклонения напряжения и сокращению времени переходного процесса. Основным недостатком САРВ, регулирующих по возмущению – избирательность. Она не позволяет учесть все возмущающие факторы $f_1(t) \dots f_n(t)$, действующие одновременно на ОР, а реагирует лишь на главное возмущение $f_1(t)$. Следствием этого является снижение точности регулирования. Самостоятельное применение САРВ по возмущению ограничено источниками малой мощности и не нашло более широкого использования. Как правило, их вводят в состав комбинированных систем.

Комбинированные САРВ реализуют оба принципа регулирования (по отклонению и по возмущению) и обладают их достоинствами. В таких системах (рис. 1, в), наряду с замкнутым контуром, образованным ГООС, имеется цепь компенсации основного возмущающего воздействия $f_1(t)$. Управляющее воздействие $u(t)$ в этом случае является функцией возмущающего воздействия $f_1(t)$ и отклонения напряжения $u(t)$ от его заданного значения $q(t)$, т.е. функцией ошибки $\varepsilon(t) = q(t) - u(t)$. Отрицательное действие всех неучтенных возмущений $f_2(t) \dots f_n(t)$ в комбинированных САРВ компенсируется или ослабляется контуром регулирования по отклонению. Он осуществляет управление компаундированием. Поэтому схемы, реализующие комбинированный принцип регулирования, называют системами управляемого компаундирования, в отличие от схем неуправляемого компаундирования, в которых реализуется лишь принцип регулирования по возмущению.

Прямое управляемое фазное компаундирование используется в генераторах отечественного производства [6] МС, ГСС, ТСС, БГ, СГД, ГМС и др. Косвенное управляемое токовое компаундирование применяется в бесщеточных генераторах, например, ГСМ или 2СН.

III. Основная часть

Качество регулирования напряжения в динамических режимах определяется форсировочной способностью САРВ, предполагающей быстрое увеличение напряжения или тока возбуждения до предельного (потолочного) значения [7]. Форсировочная способность рассмотренных САРВ ограничена их внутренними ресурсами и не всегда является достаточной при набросе или сбросе нагрузки, мощность которой сопоставима с номинальной мощностью АИЭ.

Этот недостаток существующих САРВ может быть устранен путем использования внешней форсировки возбуждения, которая позволяет существенно увеличить форсировочную способность систем [8]. Под внешней форсировкой (ВФ) понимается упреждающее увеличение возбуждения СГ за счет энергии внешнего источника, в качестве которого возможно использование, например, аккумуляторной батареи, входящей в состав электроstarterной системы пуска ЭА. ВФ следует отличать от внешней форсировки начального возбуждения, которое применяется в ряде генераторов для ускорения процесса возбуждения при пуске СГ. Блок ВФ содержит коммутатор К (рис. 2, а), построенный на электронных ключах [9]. Коммутатор К подключает соответствующим образом к выходному сигналу $u(t)$ АРУ поток энергии от внешнего источника ВИ (рис. 2, б), входящего в устройство внешней форсировки УВФ. Это устройство оценивает характер изменения основного возмущения (тока) $f_1(t) = i(t)$ и управляет коммутатором К.

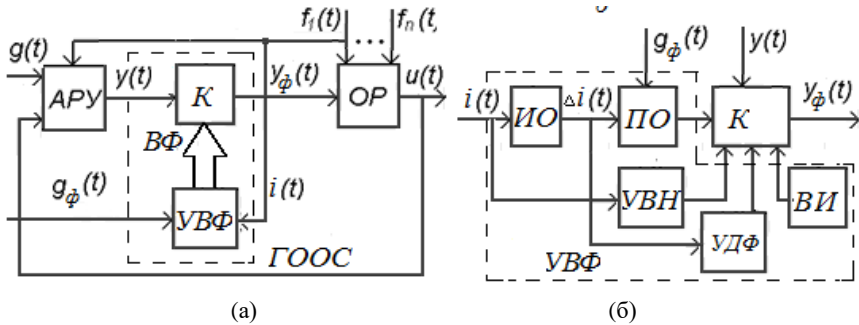


Рис. 2. Структурная схема САРВ с ВФ:
САРВ с ВФ (а); схема блока ВФ (б)

Fig. 2. Structural diagram of ARCS with external forcing (EF):
SAEC with EF (a); diagram of the EF block (б)

В общем случае УВФ может включать измерительный (ИО) и пусковой (ПО) органы, устройства выбора направления (УВН) и дозирования (УДФ) форсировки [10].

В состав ИО могут входить измерительный трансформатор, аналого-цифровой преобразователь, генератор стабильных импульсов, два регистра памяти, в которые поочередно записываются коды предыдущего и последующего мгновенного значения тока, и вычитатель, который определяет их разность. ИО измеряет приращение тока $\Delta i(t)$, которое зависит от момента выборки t (рис. 3, а) и частоты f_k выборки мгновенных значений (рис. 3, б), которая определяется частотой генератора импульсов.

IV. Результаты

Зависимость приращения тока от времени при различной частоте [11] показывает, что при увеличении частоты f_k выборки мгновенных значений в два раза (от 50 до 100 кГц) разница токов снижается с 38 до 20 %, за счет частоты вычитания записываемых кодов мгновенных значений тока улучшается быстродействие ВФ, уменьшая перерегулирование.

Наибольшее приращение $\Delta i(0)$ наблюдается в области перехода мгновенного значения тока через ноль. Оно является идентификационным и используется ПО (рис. 2, б) для запуска внешней форсировки. Основным элементом ПО является числовой компаратор, на один вход которого подается код приращения тока $\Delta i(t)$ с выхода ИО, а на другой вход – код допустимого приращения $q_{\phi}(t)$ с выхода задающего регистра. Код $q_{\phi}(t)$ соответствует пограничному уровню тока нагрузки, при котором еще достаточно внутренних ресурсов САРВ по обеспечению требуемого качества регулиро-

вания. Когда код $\Delta i(0)$ становится больше кода $q_{\Phi}(t)$, в момент перехода через ноль мгновенного значения тока ПО разрешает форсировку и запрещает ее, когда указанное условие не выполняется.

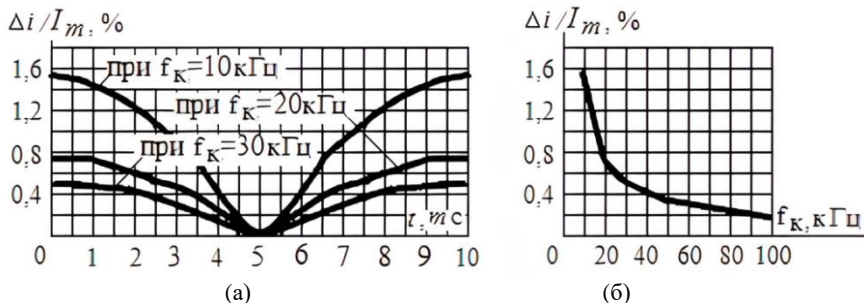


Рис. 3. Зависимости приращения тока от времени и частоты выборки мгновенных значений: зависимость от времени t (а); зависимость от частоты f_k (б)

Fig. 3. Dependences of the current increment on time and sampling frequency of instantaneous values: time dependence t (a); dependence on frequency f_k (b)

ВФ может быть однонаправленной [12, 13] и двунаправленной [14]. В структуре двунаправленной ВФ обязательно присутствие устройства выбора направления УВН, которое по характеру изменения амплитуды тока устанавливает факт наброса или сброса нагрузки и определяет для коммутатора К способ подключения внешнего источника ВИ (рис. 2, б). Однонаправленная ВФ корректирует возбуждения только при набросе нагрузки и в ее структуре УВН отсутствует.

В процессе работы ВФ в некоторых случаях возможно перерегулирование возбуждения. По возможности исключения чрезмерной форсировки различают управляемую ВФ [14] и неуправляемую ВФ [12, 13]. Управляемая ВФ имеет в составе УВФ устройство дозирования форсировки УДФ (рис. 2, б), которое оценивает величину приращения тока $\Delta i(t)$, и подает на коммутатор К управляющий сигнал, соответствующий данному приращению, исключающий перерегулирование. У неуправляемой ВФ описанная функция и УДФ, ее реализующая, отсутствует.

Таким образом, исходя из анализа приращения тока, САРВ с ВФ формирует на выходе коммутатора К (рис. 2, а) управляющее воздействие $u_{\Phi}(t)$, учитывающее будущее значение тока и характер его изменения.

У. Заключение

Проведенные исследования показали, что САРВ с ВФ по сравнению с САРВ без ВФ при прочих равных условиях позволяют улучшить показатели качества электроэнергии, снижая переходное отклонение напряжения на величину до 64 %, время восстановления напряжения – до 32 %, установившееся отклонение напряжения при изменении нагрузки – до 39 % и установившееся отклонение напряжения при неизменной нагрузке – до 42 %. Кроме того, САРВ с ВФ способны обеспечить пуск нагруженного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью до 37 % от номинальной мощности АИЭ, что в некоторых случаях позволяет повысить экономическую эффективность за счет отказа от использования устройств плавного пуска.

© Сугаков В.Г., 2023

© Хватов О.С., 2023

© Тоцев А.А., 2023

© Зобов Л.В., 2023

Поступила в редакцию 19.11.2022

Received 19.11.2022

Библиографический список

- [1] ГОСТ Р ИСО 8528-1–2005. Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Введ. 2007-01-01. М.: Стандартинформ, 2006. – 11 с.
- [2] Алексеев А. П., Кудряшев Г. Ф., Чекменев Е. Е. Дизельные и карбюраторные электроагрегаты и станции. М.: Машиностроение, 1973, – 544 с.
- [3] Емельянов И. А., Овчинников И. П. Многоагрегатные передвижные электростанции. М.: Воениздат, 1987. – 104 с.
- [4] Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
- [5] Темгеновская Т. В. Методы настройки автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 3 (55). С. 84-94.
DOI: 10.26731/1813-9108.2017.3(55).84-94
- [6] Усольцев А.А. Векторное управление асинхронными двигателями. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2002. – 43 с.
- [7] Лейзгольд Д. Ю., Ромодин А.В., Трушников К.П. Показатели качества электрической энергии как индикаторы эффективности управления электропотреблением // Фундаментальные исследования. 2014. № 11-7. С. 1501-1506.
- [8] Куро Ж. Современные технологии повышения качества электроэнергии при ее передаче и распределении // Новости электротехники. 2005. № 1 (31). С. 22-26.
- [9] Маковский А.Л. Силовые преобразователи электрической энергии в технических системах управления. Минск: БГУИР, 2018. – 252 с.

- [10] Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности. М.: Высшая школа, 2002. – 511 с.
- [11] Железко Ю.С. О нормативных документах в области качества электроэнергии и условий потребления реактивной мощности // Электрические станции. 2002. № 6. С. 18-24.
- [12] Сугаков В.Г., Хватов О.С., Волошко В.С., Малышев Ю.С. Система возбуждения синхронного генератора, Пат. 2470454 RU, заявл. 02.02.10; опубл. 20.12.12. – Бюл. № 35.
- [13] Сугаков В.Г., Хватов О.С., Малышев Ю.С., Зобов Л.В. Система регулирования возбуждения синхронного генератора с внешней форсировкой, Пат. 2723989 RU, заявл. 02.12.19; опубл. 18.06.20. – Бюл. № 17.
- [14] Сугаков В.Г., Хватов О.С., Малышев Ю.С., Тошев А.А. Система возбуждения синхронного генератора с управляемой внешней форсировкой, Пат. 2523005 RU, заявл. 27.02.13; опубл. 20.07.14. – Бюл. № 20.

References

- [1] Elektroagregaty generatoryne peremennogo toka s privodom ot dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Alternating current generating sets driven by an internal combustion engine], GOST R ISO 8528-1–2005, 2006 (in Russian).
- [2] A.P. Alekseev, G.F. Kudryashev and E.E. Chekmenev, *Dizel'nye i karbyurnyye elektroagregaty i stancii [Diesel and carburetor electric units and stations]*. Moscow: Mashinostroenie, 1973 (in Russian).
- [3] I.A. Emelyanov and I.P. Ovchinnikov, *Mnogoagregatnye peredvizhnye elektrostantsii [Multi-unit mobile electric stations]*. Moscow: Voenizdat, 1987 (in Russian).
- [4] I.V. Zhezhelenko and Yu.L. Saenko, *Pokazateli kachestva elektroenergii i ih kontrol' na promyshlennykh predpriyatiyakh [Power quality indicators and their control at industrial enterprises]*. Moscow: Energoatomizdat, 2000 (in Russian).
- [5] T.V. Temgenevskaya, “Methods of setting automatic excitation regulators of synchronous generators”, *Modern technologies. System analysis. Modeling*, vol. 3, no. 55, pp. 84-94, 2017. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.3(55).84-94
- [6] A.A. Usoltsev, *Vektornoe upravlenie asinhronnymi dvigatelyami [Vector control of asynchronous motors]*. St. Petersburg: ITMO, 2002 (in Russian).
- [7] D.Yu. Leyzgold, A.V. Romodin, K.P. Trushnikov, “Power quality indicators as effectiveness indicators of power management”, *Fundamental research*, no. 11-7, pp. 1501-1506, 2014.
- [8] J. Kuro, “Sovremennyye tekhnologii povysheniya kachestva elektroenergii pri ee peredache i raspredelenii [Modern technologies for improving the quality of electricity in its transmission and distribution]”, *News of electrical engineering*, vol. 1, no. 31, pp. 22-26, 2005 (in Russian).
- [9] A.L. Makovsky, *Silovyye preobrazovateli elektricheskoy energii v tekhnicheskikh sistemah upravleniya [Power converters of electrical energy in technical control systems]*. Minsk: BSUIR, 2018 (in Russian).
- [10] E.M. Lopukhina and G.A. Semenchukov, *Avtomatizirovannoe proektirovanie elektricheskikh mashin maloy moshchnosti [Automated design of electrical machines of low power]*. Moscow: Higher school, 2002 (in Russian).

- [11] Yu.S. Zhelezko, “O normativnyh dokumentah v oblasti kachestva elektroenergii i uslovij potrebleniya reaktivnoj moshchnosti [About normative documents in the field of power quality and conditions of reactive power consumption]”, *Elektricheskie stantsii*, no. 6, pp. 18-24, 2002 (in Russian).
- [12] V.G. Sugakov, O.S. Khvatov, V.S. Voloshko and Yu.S. Malyshev, “Sistema возбуждения синхронного генератор [Excitation system of a synchronous generator]”, Patent RU 2470454, Dec. 20, 2012 (in Russian).
- [13] V.G. Sugakov, O.S. Khvatov, Yu.S. Malyshev and L.V. Zobov, “Sistema regulirovaniya возбуждения синхронного генератора с внешней форсировкой [Excitation control system of a synchronous generator with external forcing]”, Patent RU 2723989, Jun. 18, 2020 (in Russian).
- [14] V.G. Sugakov, O.S. Khvatov, Yu.S. Malyshev and A.A. Toshchev, “Sistema возбуждения синхронного генератора с управляемой внешней форсировкой [Excitation system of a synchronous generator with controlled external forcing]”, Patent RU 2523005, Jul. 20, 2014 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сугаков Валерий Геннадьевич, доктор технических наук, профессор Волжского государственного университета водного транспорта, Нижний Новгород, Российская Федерация.

Valeriy G. Sugakov, D. Sci. (Eng.), professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Хватов Олег Станиславович, доктор технических наук, профессор Волжского государственного университета водного транспорта, Нижний Новгород, Российская Федерация.

Oleg S. Khvatov, D. Sci. (Eng.), professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Тощев Александр Александрович, соискатель Волжского государственного университета водного транспорта, Нижний Новгород, Российская Федерация.

Aleksandr A. Toshchev, applicant of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Зобов Лаврентий Владиславович, соискатель Волжского государственного университета водного транспорта, Нижний Новгород, Российская Федерация.

Lavrentii V. Zobov, applicant of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

DOI 10.46960/2658-6754_2023_1_62

**РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МИКРОСЕТИ
ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
НА БАЗЕ ЭНЕРГОРОУТЕРОВ И НАКОПИТЕЛЕЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ****Ю.Н. Булатов**

ORCID: 0000-0002-3716-5357 e-mail: bulatovyura@yandex.ru

Братский государственный университет

*Братск, Россия***А.В. Крюков**

ORCID: 0000-0001-6543-1790 e-mail: and_kryukov@mail.ru

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Иркутский государственный университет путей сообщения

*Иркутск, Россия***К.В. Суслов**

ORCID: 0000-0003-0484-2857 e-mail: dr.souslov@yandex.ru

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Иркутск, Россия

В статье приведено описание компьютерной модели объединения кластеров постоянного и переменного тока на базе энергороутеров с установками распределенной генерации и накопителями электроэнергии, реализованной в системе *MATLAB*. Модель является гибкой и позволяет дополнительно подключать любые установки распределенной генерации и потребителей электроэнергии. Представлены результаты моделирования провалов напряжения в нормальных и аварийных режимах работы кластеров, а также исследования предлагаемых методов управления напряжением с помощью энергетических роутеров и накопителей электроэнергии. В режиме работы без накопителей электроэнергии использование энергетических роутеров с регулируемым инвертором дает возможность снизить глубину провала напряжения; при постоянно подключенных к сети накопителях электроэнергии обеспечивается стабильность напряжения в сети; последовательное подключение накопителей электроэнергии позволяет повысить напряжение в сети постоянного и переменного тока до номинального уровня.

Ключевые слова: моделирование, накопители электроэнергии, распределенная генерация, распределительные электрические сети, сети постоянного тока, энергетический роутер.

Для цитирования: Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Регулирование напряжения в микросети постоянного и переменного тока на базе энергороутеров и накопителей электроэнергии // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 1. С. 62-84. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_62

VOLTAGE REGULATION IN DC AND AC MICROGRID BASED ON ENERGY ROUTERS AND ENERGY STORAGES

Yu.N. Bulatov

ORCID: 0000-0002-3716-5357 e-mail: bulatovyura@yandex.ru

Bratsk State University

Bratsk, Russia

A.V. Kryukov

ORCID: 0000-0001-6543-1790 e-mail: and_kryukov@mail.ru

Irkutsk National Research Technical University

Irkutsk State Transport University

Irkutsk, Russia

K.V. Suslov

ORCID: 0000-0003-0484-2857 e-mail: dr.souslov@yandex.ru

Irkutsk National Research Technical University

Irkutsk, Russia

Abstract. The development of the electric power industry in modern conditions involves the transition to a technological platform that promotes the introduction of smart grids. The smart grid may include separate clusters (microgrid) consisting of electricity consumers, electrical networks and distributed generation plants. To increase energy efficiency in a smart grid, one can integrate DC microgrids that provide power to consumers inside a building (or several buildings) and on the territory of enterprises. Combining direct and alternating current microgrids with distributed generation plants and energy storage devices is advisable to be performed on the basis of energy routers to connect networks with different voltage classes. The paper describes a computer model for combining DC and AC microgrids based on energy routers with distributed generation plants and power storage devices, developed in the MATLAB system. The model is flexible and allows you to additionally connect any distributed generation plants and electricity consumers. The results of simulation of voltage dips in normal and emergency modes of operation of DC and AC microgrids, as well as the study of the proposed methods of voltage control using energy routers and energy storage devices, are presented. The use of energy routers with a

regulated inverter makes it possible to reduce the depth of the voltage dip in the operation mode without energy storage devices; the stability of the voltage in the network is observed with energy storage devices permanently connected to the network; the series connection of energy storage devices allows to increase the voltage to the nominal level in the DC and AC networks.

Keywords: modeling, electric energy storage, distributed generation, electrical distribution networks, direct current networks, energy router.

For citation: Yu.N. Bulatov, A.V. Kryukov and K.V. Suslov, “Voltage regulation in DC and AC microgrid based on energy routers and energy storages”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 62-84, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_62

I. Введение

Развитие электроэнергетики в современных условиях предполагает переход к технологической платформе, способствующей внедрению интеллектуальных сетей (*smart grid*) [1-3], использующих цифровые устройства для измерения, сбора и обработки данных, релейной защиты и автоматики, диагностики и мониторинга и др. Применение интеллектуальных технологий в *smart grid* позволяет решить целый ряд проблем, например: проблему интеграции возобновляемых источников энергии [4, 5], улучшения качества электроэнергии [6], управления напряжением [7], повышения энергоэффективности [8] и др.

В состав интеллектуальной сети могут входить отдельные кластеры (*microgrid*) [9, 10], состоящие из потребителей электроэнергии, электрических сетей и установок распределенной генерации (РГ) [11, 12], в том числе, использующих возобновляемые источники энергии (ВИЭ) [13, 14]. Для повышения энергоэффективности в интеллектуальную сеть можно интегрировать кластеры постоянного тока [15], обеспечивающие электроснабжение потребителей внутри здания (или нескольких зданий) [16, 17] и на территории предприятий [18]. Электрические сети постоянного тока имеют следующие преимущества [19]:

- отсутствуют реактивные сопротивления;
- не передается реактивная мощность;
- снижены электромагнитные влияния на смежные линии;
- упрощаются схемы преобразователей частоты, которыми оснащаются большинство современных электродвигателей;
- упрощаются вторичные источники электропитания электронных устройств и светодиодного освещения (не требуются выпрямители);
- облегчается подключение ВИЭ, являющихся, как правило, источниками постоянного напряжения (солнечные батареи, топливные элементы, аккумуляторы и др.), не требуются инверторы;

- отсутствуют проблемы устойчивости параллельной работы генераторов;
- упрощается реализация сетей для зарядки электромобилей;
- возможна привязка к сетям железной дороги постоянного тока.

Таким образом, объединение *microgrid* постоянного и переменного тока с установками РГ и накопителями электроэнергии (НЭ) можно считать неотъемлемой частью интеллектуальных сетей. Формирование таких объединений целесообразно выполнять на основе энергетических роутеров (ЭР) [20, 21] для связи сетей постоянного и переменного тока с различным классом напряжения. Проведенные исследования [21] показывают, что применение ЭР позволяет повысить качество электроэнергии в сетях 0,4 кВ, подключенных к районным обмоткам тяговых трансформаторов.

Целью данного исследования является разработка компьютерной модели объединения на базе энергороутеров *microgrid* постоянного и переменного тока с установками РГ и НЭ, а также исследование предлагаемых методов регулирования напряжения в нормальных и аварийных режимах работы. Ниже приведено описание компьютерной модели, разработанной в системе *MATLAB*. Представлены результаты моделирования провалов напряжения в нормальных и аварийных режимах работы распределительной сети постоянного и переменного тока, а также результаты исследования предлагаемых методов регулирования напряжения с помощью ЭР и НЭ.

II. Структура и описание компьютерной модели объединения кластеров постоянного и переменного тока

Использование объединения кластеров постоянного и переменного тока на базе ЭР позволит реализовать ряд функций:

- управление напряжением в точках подключения ЭР;
- регулирование перетоков мощности в распределительной сети;
- управление установками РГ на базе ВИЭ и НЭ с обеспечением демпфирования колебаний напряжения и мощности.

В основе ЭР лежит твердотельный трансформатор (*SST*), имеющий различные конфигурации [22, 23]:

- одноступенчатая с прямым преобразованием переменного напряжения;
- двухступенчатая с низковольтным звеном постоянного тока;
- двухступенчатая с высоковольтным звеном постоянного тока;
- трехступенчатая с высоковольтным и низковольтным звеньями постоянного тока.

Трехступенчатая топология ЭР, показанная на рис. 1, является одним из лучших решений для интеллектуальных сетей. Она позволяет предоставлять вспомогательные услуги как высоковольтным, так и низковольтным потребителям постоянного и переменного тока и подключать различные установки РГ с НЭ.

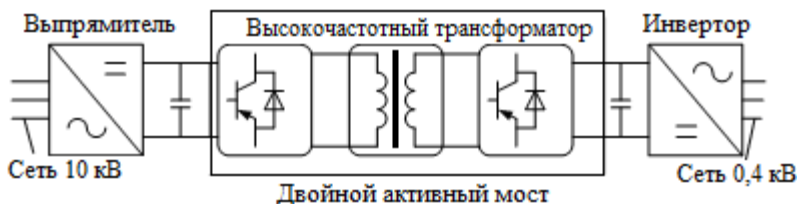


Рис. 1. Трехступенчатая топология ЭР

Fig. 1. Three-stage power router topology

В высокочастотном инверторе ЭР могут применяться биполярные транзисторы с изолированным затвором (*Insulated-gate bipolar transistor – IGBT*), позволяющие коммутировать токи выше 1 кА. Эффективное применение такого транзистора ограничено частотой переключений, при которой потери находятся в допустимых пределах, обеспечивающих КПД преобразования выше 90 %. Эта частота не должна превышать 5000 Гц.

Для объединения электрических сетей постоянного тока с различным классом напряжения может применяться ЭР на основе однофазного высокочастотного трансформатора с управляемым инвертором на стороне высокого напряжения (ВН) и выпрямителем на стороне низкого напряжения (НН). Модель такого ЭР была разработана в системе *MATLAB* с помощью пакетов имитационного моделирования *Simulink* и *SimPowerSystems*. Схема модели предлагаемого ЭР для объединения сетей постоянного тока с напряжением 10 кВ на стороне ВН и 0,22 кВ на стороне НН представлена на рис. 2.

Схема модели системы управления инвертором на стороне ВН ЭР показана на рис. 3. Система управления состоит из регулятора напряжения (блок *Voltage regulator* на рис. 3) с пропорционально-интегральным (ПИ) алгоритмом регулирования, на вход которого подается действующее значение напряжения на стороне ВН высокочастотного трансформатора и уставка по напряжению в относительных единицах. Для формирования синусоидального напряжения с заданной частотой 5000 Гц используется блок *Sine Wave*, выходной сигнал которого перемножается с выходным сигналом ПИ-регулятора, и поступает в качестве управляющего сигнала на вход генератора с широтно-импульсной модуляцией (блок *PWM Generator* на рис. 3) для формирования соответствующих импульсов управления инвертором. Таким образом выполняется регулирование уровня напряжения.

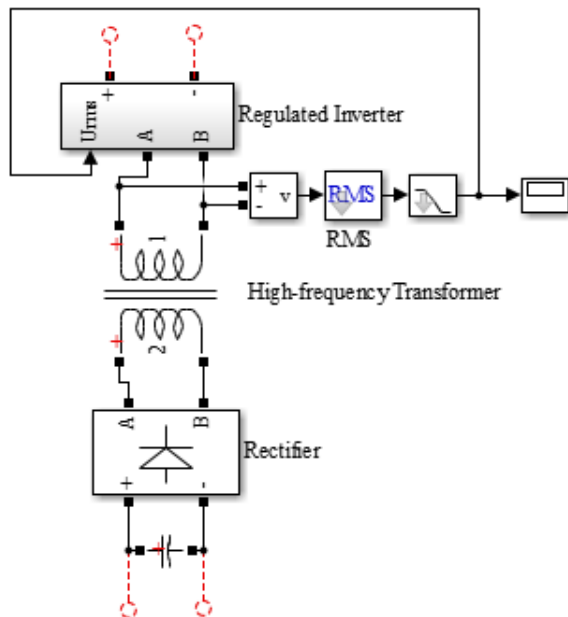


Рис. 2. Схема модели энергоинвертера для сетей постоянного тока в *MATLAB*

Fig. 2. Diagram of a power router model for DC networks in *MATLAB*

Для сглаживания пульсаций и подавления помех на выходе инвертора используется *LC*-фильтр. Регулирование уровня напряжения на сторонах ВН и НН высокочастотного трансформатора может осуществляться также при подаче на вход ПИ-регулятора действующего значения напряжения на стороне НН.

Схема исследуемой распределительной сети постоянного тока на базе ЭР с установками РГ и НЭ представлена на рис. 4.

ЭР с однофазными высокочастотными трансформаторами связывает сети постоянного тока высокого и низкого напряжения. Наличие НЭ на стороне НН позволяет эффективно управлять графиком нагрузки сети и сглаживать возможные колебания напряжения и мощности, в частности, из-за наличия установок РГ на базе ВИЭ. На стороне НН ЭР возможно подключение инвертора с регулятором напряжения для потребителей переменного тока. Аккумуляторная батарея большой мощности, подключенная на стороне ВН ЭР, позволяет повысить надежность электроснабжения и сгладить колебания напряжения и мощности в случае перехода рассматриваемого кластера в изолированный режим.

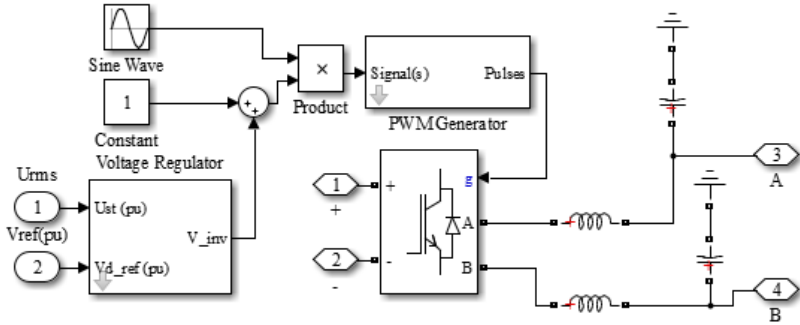


Рис. 3. Схема системы управления инвертором

Fig. 3. Diagram of inverter control system

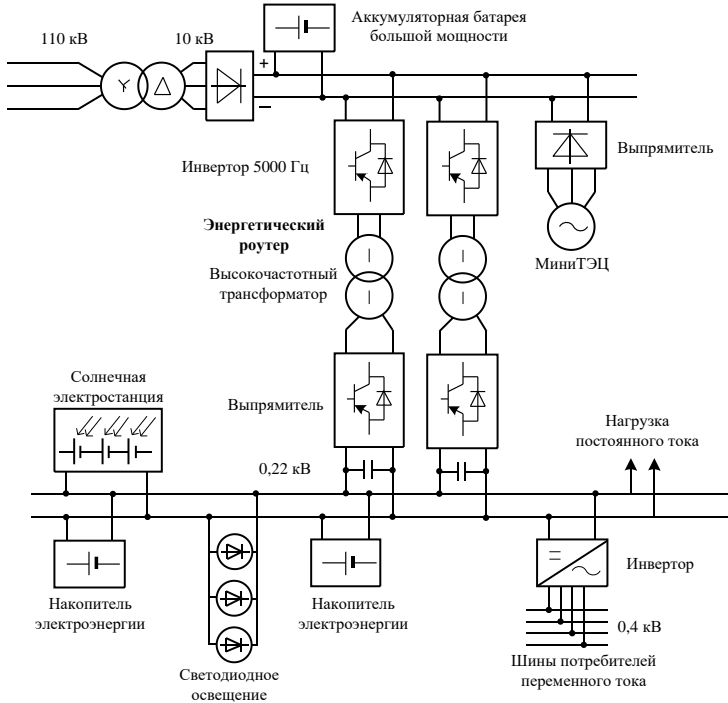


Рис. 4. Схема исследуемой сети постоянного тока на базе энергорутеров

Fig. 4. Scheme of the studied DC network based on energy routers

Электрическая сеть со стороны 10 кВ ЭР связана через трансформатор с питающей электроэнергетической системой (ЭЭС) 110 кВ. Для исследования нормальных и аварийных режимов работы описанной электрической сети была разработана компьютерная модель. НЭ на основе литий-ионных аккумуляторных батарей [24] моделировались блоками *Battery* пакета *SimPowerSystems* системы *MATLAB*. На стороне ВН ЭР использовалась аккумуляторная батарея емкостью 10000 А·ч, а на стороне НН – НЭ емкостью по 4000 А·ч.

В сети моделировались следующие установки РГ:

- мини-теплоэлектростанция (ТЭЦ) мощностью 2,5 МВ·А на стороне 10 кВ ЭР;
- солнечная электростанция (СЭС) на стороне 0,22 кВ.

Схема модели мини-ТЭЦ показана на рис. 5.

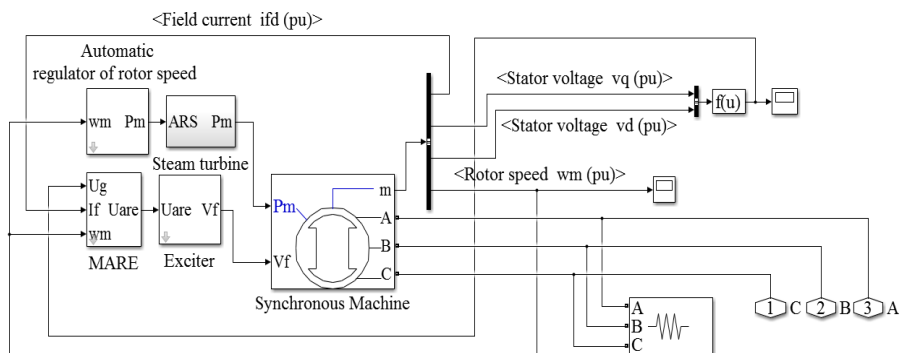


Рис. 5. Схема модели мини-ТЭЦ в *MATLAB*

Fig. 5. Scheme of the model of a mini heat and power plant in *MATLAB*

Турбогенератор мини-ТЭЦ моделировался стандартным блоком *Synchronous Machine pu Fundamental* библиотеки *SymPowerSystems* системы *MATLAB*. Структурная схема модели паровой турбины с промежуточным отбором пара (блок *Steam turbine* на рис. 5) представлена на рис. 6. Тиристорный возбудитель (блок *Exciter* на рис. 5) моделировался аperiodическим звеном первого порядка с коэффициентом $k_e = 1$, постоянной времени $T_e = 0,025$ с и блоком ограничения напряжения [25]. Регулирование скорости вращения ротора и напряжения турбогенератора выполнялось с помощью прогностического автоматического регулятора скорости (АРС) (блок *Automatic regulator of rotor speed*) и автоматического регулятора возбуждения (АРВ) (блок *MARE*), описание которых приведено в [26].

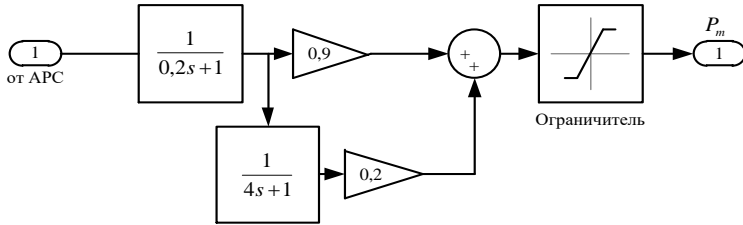
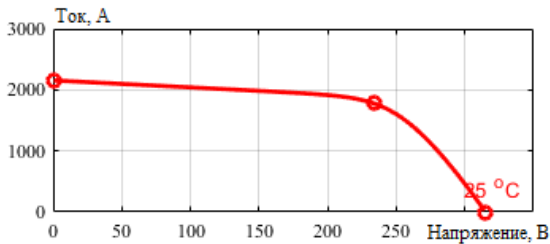


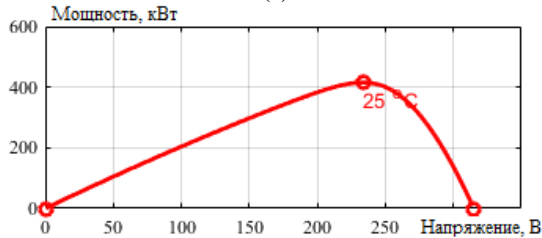
Рис. 6. Схема модели паровой турбины

Fig. 6. Steam turbine model diagram

Модель СЭС реализована с использованием блока *PV Array* системы *MATLAB*, построенного на основе 400 параллельных и 14 последовательных солнечных фотоэлектрических модулей, соединенных между собой, и позволяющих получить максимальную мощность 415 кВт. Применялись две модели СЭС, имеющих вольт-амперные и мощностные характеристики, показанные на рис. 7. Результаты компьютерного моделирования показали работоспособность и адекватность разработанной модели распределительной сети постоянного тока с ЭР. Модель является гибкой и позволяет дополнительно подключать практически любые установки РГ и различных потребителей электроэнергии.



(а)



(б)

Рис. 7. Вольт-амперная (а) и мощностная (б) характеристики модели СЭС

Fig. 7. Volt-ampere (a) and power (b) characteristics of a solar power plant model

III. Результаты моделирования

Для исследования нормальных и аварийных режимов представленной электрической сети постоянного и переменного тока с ЭР рассматривались следующие возмущения:

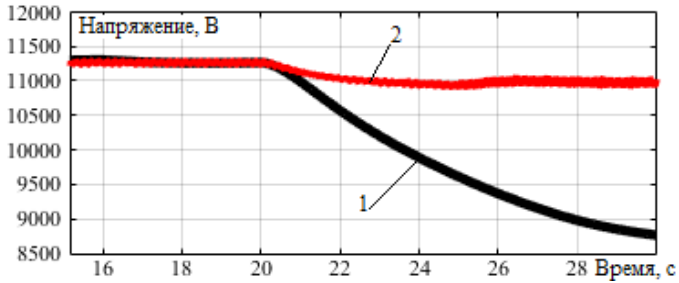
- внезапное отключение от питающей ЭЭС 110 кВ;
- подключение дополнительной мощной нагрузки в сети постоянного тока на стороне НН ЭР;
- значительное снижение интенсивности солнечного излучения.

Для регулирования напряжения в этих режимах использовались ЭР с регулируемыми инверторами на стороне ВН, а также постоянно включенные или подключаемые при снижении напряжения НЭ.

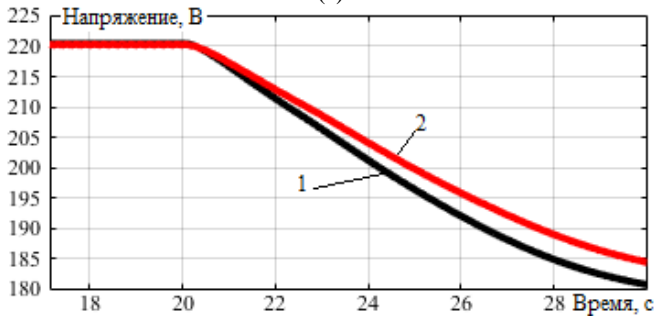
Отключение распределительной сети постоянного тока от питающей ЭЭС 110 кВ вызывает провал напряжения; при этом использование ЭР с регулируемым инвертором на стороне ВН дает возможность уменьшить глубину снижения напряжения в сетях постоянного и переменного тока, но большего эффекта удастся достичь на стороне 10 кВ ЭР – провал напряжения практически отсутствует. Если использовать ЭР с нерегулируемыми инверторами на стороне ВН, то глубина провала напряжения в сети 10 кВ достигает 22 %. Соответствующие временные зависимости напряжений в сети постоянного и переменного тока на сторонах ВН и НН ЭР представлены на рис. 8. Необходимо отметить, что в данном эксперименте все НЭ в сети были отключены.

При постоянно подключенных к сети НЭ и особенно аккумуляторной батарее большой мощности на стороне ВН ЭР наблюдается обеспечение стабильности напряжения в сети, даже после отключения связи с питающей ЭЭС 110 кВ. В этом случае поддержание напряжения на номинальном уровне достигается при регулируемых и нерегулируемых инверторах на стороне ВН ЭР.

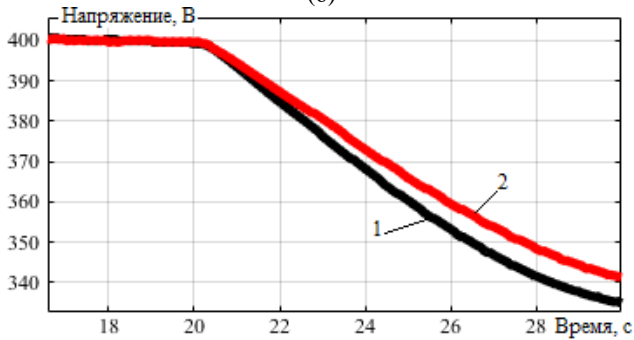
Другой эксперимент для определения возможности регулирования напряжения заключался в том, что на СЭС были постоянно включены НЭ, на стороне ВН ЭР аккумуляторная батарея большой мощности была отключена, а для повышения уровня напряжения использовалось дополнительное подключение двух НЭ в сети 220 В постоянного тока. Временные зависимости напряжений в сети при отключении питающей ЭЭС 110 кВ представлены на рис. 9.



(а)



(б)



(в)

Рис. 8. Временные зависимости напряжений:
на стороне ВН ЭР (а); на стороне НН ЭР (сеть постоянного тока) (б);
на стороне НН ЭР после инвертора (в сети переменного тока) (в);
1 – нерегулируемые ЭР; 2 – регулируемые ЭР

Fig. 8. Time dependencies of voltages: on the high voltage side of the energy router (ER) (a); on the low voltage side of the ER (DC network) (b); on the low voltage side of the ER after the inverter (in the AC network) (c); 1 – unregulated ER; 2 – regulated ER

Результаты эксперимента показывают, что при постоянно включенных НЭ на СЭС глубина провала напряжения в сети уменьшается: на стороне ВН ЭР на 4 % (характеристики 1 на рис. 8, а и рис. 9, а); на стороне НН ЭР в сети постоянного тока на 11 % (характеристики 1 на рис. 8, б и рис. 9, б); на стороне НН ЭР после инвертора на 10 % (характеристики 1 на рис. 8, в и рис. 9, в). Использование регулируемых ЭР позволяет уменьшить глубину провала напряжения и практически исключить его на стороне ВН, а при дополнительном подключении НЭ в сети 220 В постоянного тока удастся поддерживать напряжение на номинальном уровне на стороне НН ЭР после отключения питающей ЭЭС 110 кВ (характеристики 3 на рис. 9).

В табл. 1 приведены сводные результаты моделирования провала напряжения в исследуемой электрической сети при отключении питающей ЭЭС 110 кВ. Максимальная глубина провала напряжения определялась в % по выражению:

$$\delta U_{\Pi}^{\max} = \frac{U_{\text{ном}} - U_{\min}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% ,$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, В; U_{\min} – минимальное напряжение при провале, В.

Из табл. 1 видно, что использование регулируемых ЭР позволяет в среднем уменьшить на 2 % глубину провала напряжения на стороне НН в сетях постоянного и переменного тока и на 19,5 % на стороне ВН. При постоянно подключенных НЭ на СЭС и использовании регулируемых ЭР удастся уменьшить максимальную глубину провала напряжения в среднем на 8,5 % на стороне НН в сетях постоянного и переменного тока и на 1 % на стороне ВН.

Подключение дополнительной мощной нагрузки в сети постоянного тока на стороне НН ЭР также вызывает провал напряжения. При отключенных НЭ во всей сети использование ЭР с регулируемыми инверторами позволяет уменьшить глубину провала. Полученные временные зависимости напряжений для данного режима при отключенных НЭ приведены на рис. 10.

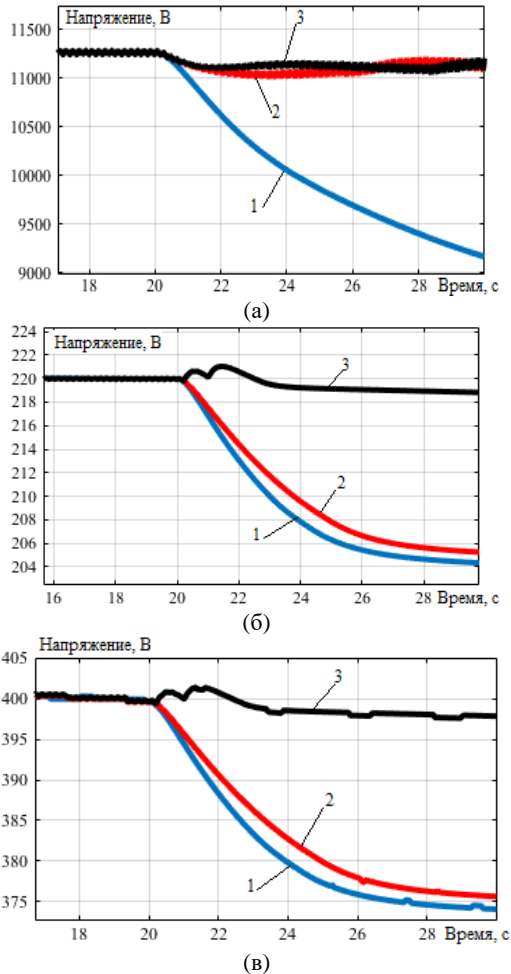


Рис. 9. Временные зависимости напряжений при отключении питающей ЭЭС:
на стороне ВН ЭР (а); на стороне НН ЭР (сеть постоянного тока) (б);
на стороне НН ЭР после инвертора (в сети переменного тока) (в);
1 – нерегулируемые ЭР; 2 – регулируемые ЭР;
3 – регулируемые ЭР при подключении дополнительных НЭ в сети 220 В

Fig. 9. Time dependences of voltages when the supply EPS is turned off:
on the high voltage side of the energy router (ER) (a); on the low voltage side of the ER
(DC network) (b); on the low voltage side of the ER after the inverter (in the AC net-
work) (c); 1 – unregulated ER; 2 – regulated ER; 3 – regulated ER when connecting ad-
ditional energy storage devices in the 220 V network

Таблица 1.
Глубина провала напряжения при отключении питающей ЭЭС

Table 1.
The depth of the voltage dip when the supply EPS is turned off

Режим работы сети	Максимальная глубина провала напряжения на стороне ВН ЭР δU_{II}^{\max} , %	Максимальная глубина провала напряжения на стороне НН ЭР в сети постоянного тока δU_{II}^{\max} , %	Максимальная глубина провала напряжения на стороне НН ЭР в сети переменного тока δU_{II}^{\max} , %
1. Нерегулируемые ЭР без использования НЭ	21,8	18,2	16,3
2. Регулируемые ЭР без использования НЭ	2,3	15,9	14,5
Снижение глубины провала напряжения в режиме 2 по сравнению с режимом 1, %	19,5	2,3	1,8
3. Регулируемые ЭР с постоянно подключенными на СЭС НЭ	1,4	6,4	7
Снижение глубины провала напряжения в режиме 3 по сравнению с режимом 2, %	0,9	9,5	7,5

Затем также был проведен эксперимент по подключению дополнительной мощной нагрузки в сети 220 В постоянного тока в режиме отключенной аккумуляторной батареи большой мощности и при постоянно включенных НЭ на СЭС. Для повышения уровня напряжения также использовалось подключение двух НЭ в сети 220 В постоянного тока. Временные зависимости напряжений в сети при подключении мощной нагрузки в момент времени $t = 20$ с представлены на рис. 11. Результаты эксперимента показывают, что при постоянно включенных НЭ на СЭС глубина провала напряжения в сети уменьшается: на стороне НН ЭР в сети постоянного тока на 4 % (характеристики 1 на рис. 10, а и рис. 11, а); на стороне НН ЭР после инвертора на 4,5 % (характеристики 1 на рис. 10, б и рис. 11, б). Использование регулируемых ЭР позволяет уменьшить глубину провала напряжения, а при дополнительном последовательном подключении НЭ в сети 220 В постоянного тока удается поднять напряжение до номинального уровня (характеристики 3 на рис. 11).

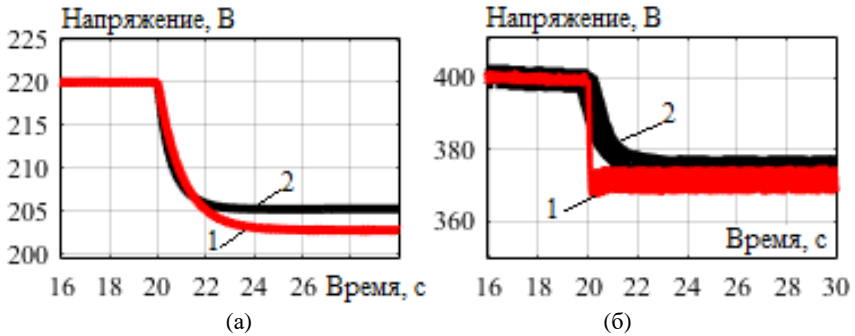


Рис. 10. Временные зависимости напряжений после подключения мощной нагрузки в сети 220 В: на стороне НН ЭР (сеть постоянного тока) (а); на стороне НН ЭР после инвертора (в сети переменного тока) (б); 1 – нерегулируемые ЭР; 2 – регулируемые ЭР

Fig. 10. Time dependences of voltages after connecting a powerful load in the 220 V network: on the low voltage side of the energy router (ER) (DC network) (a); on the low voltage side of the ER after the inverter (in the AC network) (b); 1 – unregulated ER; 2 – regulated ER

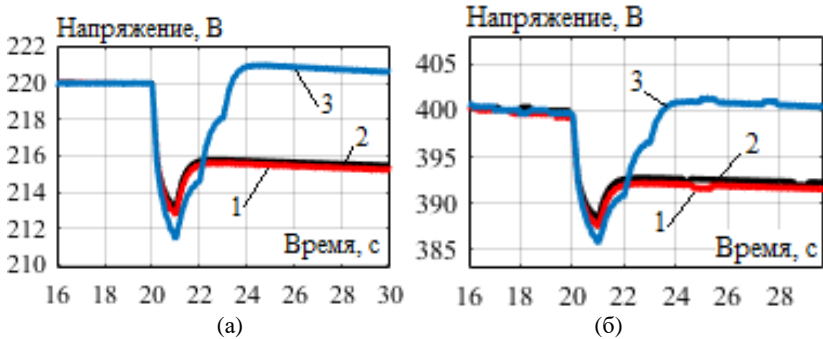


Рис. 11. Временные зависимости напряжений: на стороне НН ЭР (сеть постоянного тока) (а); на стороне НН ЭР (в сети переменного тока) (б); 1 – нерегулируемые ЭР; 2 – регулируемые ЭР; 3 – регулируемые ЭР при последовательном подключении НЭ в сети 220 В

Fig. 11. Time dependences of voltages: on the low voltage side of the energy router (ER) (DC network) (a); on the low voltage side of the ER (in the AC network) (b); 1 – unregulated ER; 2 – regulated ER; 3 – regulated ER with serial connection of electric power storage devices in the 220 V network

В табл. 2 приведены сводные результаты моделирования при подключении дополнительной мощной нагрузки. Использование регулируемых ЭР позволяет уменьшить на 1 % глубину провала напряжения на стороне НН в сети постоянного и переменного тока, а при постоянно подключенных НЭ на СЭС дает возможность уменьшить эту величину в среднем на 3 %.

Таблица 2.

Глубина провала напряжения при подключении мощной нагрузки

Table 2.
Depth of voltage dip when connecting a powerful load

Режим работы сети	Максимальная глубина провала напряжения на стороне НН ЭР в сети постоянного тока δU_{Γ}^{\max} , %	Максимальная глубина провала напряжения на стороне НН ЭР в сети переменного тока δU_{Γ}^{\max} , %
1. Нерегулируемые ЭР без использования НЭ	7,7	7,5
2. Регулируемые ЭР без использования НЭ	6,8	6,3
Снижение глубины провала напряжения в режиме 2 по сравнению с режимом 1, %	0,9	1,2
3. Регулируемые ЭР с постоянно подключенными на СЭС НЭ	3,2	3
Снижение глубины провала напряжения в режиме 3 по сравнению с режимом 2, %	3,6	3,3

Провал напряжения в сети моделировался также при значительном снижении интенсивности солнечного излучения, что уменьшает выработку электроэнергии на СЭС. Для повышения уровня напряжения использовались регулируемые ЭР и НЭ на СЭС. При уменьшении мощности СЭС наблюдается незначительное снижение напряжения. Использование регулируемых ЭР дает возможность понизить глубину провала напряжения. Соответствующие временные зависимости напряжения представлены на рис. 12. Результаты регулирования напряжения с помощью НЭ при снижении интенсивности солнечного излучения показаны на рис. 13. При постоянно включенных на СЭС НЭ глубина провала напряжения в сети постоянного тока меньше в 1,6 раза по сравнению с режимом, когда НЭ не используются (характеристики 1 на рис. 12, б и рис. 13, а). Однако при постоянно включенных НЭ поднять напряжение до номинального уровня не получается. Решить

данную проблему удастся путем подключения дополнительных НЭ при понижении напряжения (характеристики 2 на рис. 13).

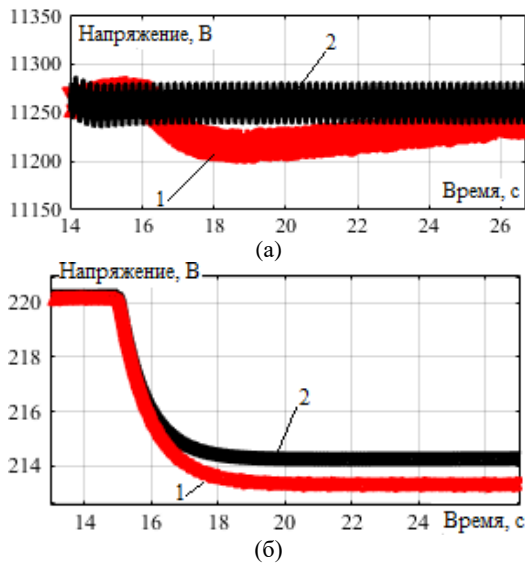


Рис. 12. Временные зависимости напряжений:
на стороне ВН ЭР (а); на стороне НН ЭР (сеть постоянного тока) (б);
1 – нерегулируемые ЭР; 2 – регулируемые ЭР

Fig. 12. Time dependences of voltages:
on the high voltage side of the energy router (ER) (a); on the low voltage side of the ER
(DC network) (b); 1 – unregulated ER; 2 – regulated ER

IV. Заключение

Представлено описание компьютерной модели объединения *microgrid* постоянного и переменного тока на базе ЭР с установками РГ и НЭ. Модель является гибкой и позволяет дополнительно подключать любые установки РГ и различных потребителей электроэнергии. Результаты компьютерного моделирования позволяют сформулировать следующие выводы.

1. В режиме работы без НЭ использование ЭР с регулируемым инвертором на стороне ВН дает возможность при отключении питающей ЭЭС уменьшить на 2 % глубину провала напряжения на стороне НН в сетях постоянного и переменного тока, но большего эффекта удастся достичь на стороне 10 кВ ЭР – провал напряжения практически отсутствует. Если использовать ЭР с нерегулируемыми инверторами на стороне ВН, то глубина провала напряжения в сети 10 кВ достигает 22 %.

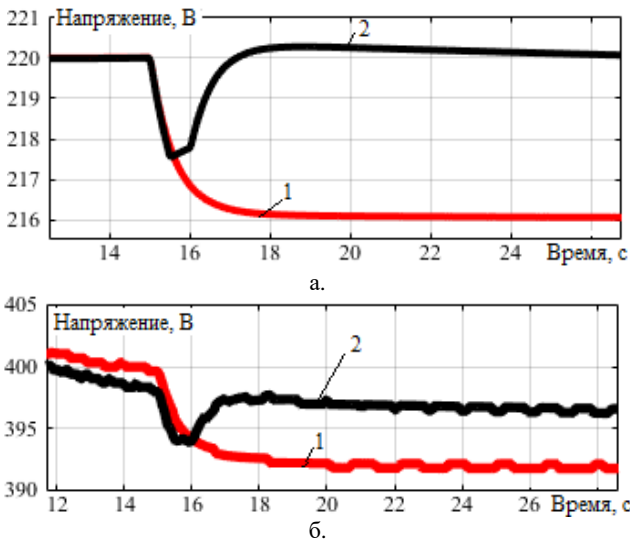


Рис. 13. Временные зависимости напряжений:
на стороне НН ЭР (сеть постоянного тока) (а);
на стороне НН ЭР (в сети переменного тока) (б); 1 – НЭ на СЭС постоянно
включены; 2 – НЭ на СЭС подключаются при снижении напряжения

Fig. 13. Time dependencies of voltages:
on the low voltage side of the energy router (ER) (DC network) (a);
on the low voltage side of the ER (in the AC network) (b);
1 – electricity storage devices at solar power plants are constantly on;
2 – electricity storage devices at solar power plants are connected when the voltage drops

2. При постоянно подключенных к сети НЭ и особенно аккумуляторной батарее большой мощности на стороне ВН ЭР обеспечивается стабильность напряжения в сети, даже после отключения связи с питающей ЭЭС 110 кВ. Поддержание напряжения на номинальном уровне достигается как при регулируемых, так и нерегулируемых инверторах на стороне ВН ЭР.

3. При постоянно включенных НЭ на СЭС и во время отключения питающей ЭЭС глубина провала напряжения в сети уменьшается: на стороне ВН ЭР – на 4 %; на стороне НН ЭР в сети постоянного тока – на 11 %; на стороне НН ЭР после инвертора – на 10 %. Использование регулируемых ЭР позволяет дополнительно уменьшить глубину провала напряжения и практически исключить его на стороне ВН, а при подключении дополнительных НЭ в сети 220 В постоянного тока удастся поддерживать напряжение на номинальном уровне на стороне НН ЭР даже после отключения питающей ЭЭС

110 кВ.

4. При отключенных НЭ во всей сети в режиме подключения мощной нагрузки использование ЭР с регулируемыми инверторами позволяет уменьшить в среднем на 1 % глубину провала напряжения на стороне НН в сети постоянного и переменного тока, а при постоянно подключенных НЭ на СЭС дает возможность уменьшить эту величину в среднем на 3 %.

5. При постоянно включенных НЭ на СЭС во время подключения мощной нагрузки глубина провала напряжения в сети уменьшается: на стороне НН ЭР в сети постоянного тока на 4 %; на стороне НН ЭР после инвертора на 4,5 %. Использование регулируемых ЭР и дополнительно подключаемых НЭ в сети 220 В постоянного тока позволяет поднять напряжение до номинального уровня на стороне НН ЭР.

6. При значительном снижении интенсивности солнечного излучения, уменьшающем выработку электроэнергии на СЭС, в узлах сети может снизиться напряжение. Использование регулируемых ЭР дает возможность повысить его уровни. Увеличить напряжения до номинальных значений в сети постоянного и переменного тока можно на основе последовательного подключения НЭ на СЭС.

© Булатов Ю.Н., 2023

© Крюков А.В., 2023

© Суслов К.В., 2023

Поступила в редакцию 06.12.2022

Received 06.12.2022

Библиографический список

- [1] Bayindir R., Colak I., Fulli G., Demirtas K. Smart grid technologies and applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. № 66. P. 499-516. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.002
- [2] Mohsen F.N., Amin M.S., Hashim H. Application of smart power grid in developing countries // *proc. 2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, June 3-4, 2013, Langkawi, Malaysia: IEEE, 2013. DOI: 10.1109/PEOCO.2013.6564586
- [3] Buchholz B.M., Styczynski Z.A. *Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – 396 p.
- [4] Bhalshankar S.S., Thorat C.S. Integration of smart grid with renewable energy for energy demand management: Puducherry case study // *proc. 2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs)*, Oct. 03-05, 2016, Paralakhemundi, India: IEEE, 2016. P. 1-5. DOI: 10.1109/SCOPEs.2016.7955498
- [5] Bulatov Yu., Kryukov A., Nguyen V.H., Tran D.H. Fuzzy controller of rotation angle of blades of horizontal-axial wind power generation plant // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 983. P. 892-901.

- [6] Suslov K., Solonina N., Stepanov V. A principle of power quality control in the intelligent distribution networks // proc. 2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), Sep. 08-11, 2015, Vienna, Austria: IEEE, 2015. P. 260-264. DOI: 10.1109/SEDST.2015.7315218
- [7] Antoniadou-Plytaria K.E., Kouveliotis-Lysikatos I.N., Georgilakis P.S. and Hatziar-gyriou N.D. Distributed and decentralized voltage control of smart distribution net-works: models, methods, and future research // IEEE Transactions on Smart Grid. 2017. № 8 (6). P. 2999-3008. DOI: 10.1109/TSG.2017.2679238
- [8] Colak I., Bayindir R., Sagiroglu S. The effects of the smart grid system on the national grids // proc. 2020 8th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid), Jun. 17-19, 2020, Paris, France: IEEE, 2020. P. 122-126. DOI: 10.1109/icSmart-Grid49881.2020.9144891
- [9] Olivares D. et al. Trends in microgrid control // IEEE Transactions on Smart Grid. 2014. № 5 (4). P. 1905-1919. DOI: 10.1109/TSG.2013.2295514
- [10] Katiraei F., Irvani M.R., Lehn P. Micro-grid autonomous operation during and sub-sequent to islanding process // IEEE Transactions on Power Delivery. 2005. № 20 (1). P. 248-257. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.835051
- [11] Sikorski T., Rezmer J. Distributed generation and its impact on power quality in low-voltage distribution networks // Power Quality Issues in Distributed Generation, Luszcz J. London: InTech, 2015. DOI: 10.5772/61172
- [12] Aderibigbe M.A., Adogbe A.U., Agbetuyi F., Aioboman A.E. Impact of distributed generations on power systems stability: A review // proc. 2022 IEEE Nigeria 4th In-ternational Conference on Disruptive Technologies for Sustainable Development (NI-GERCON), Apr. 05-07, 2022. P. 1-5. DOI: 10.1109/NIGERCON54645.2022.9803062
- [13] Венге К. и др. Возобновляемые Источники Энергии: Теоретические Основы, Технологии, Технические Характеристики, Экономика. Магдебург: Отто-фон-Герике Университет, 2010. – 211 с.
- [14] Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 39. P. 748-764. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.113
- [15] Chen D., Xu Y., Huang A.Q. Integration of DC microgrids as virtual synchronous machines into the AC grid // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017. № 64 (9). P. 7455-7466. DOI: 10.1109/TIE.2017.2674621
- [16] Sechilariu M., Locment F., Wang B. Photovoltaic electricity for sustainable building. Efficiency and energy cost reduction for isolated DC microgrid // Energies. 2015. № 8 (8). P. 7945-7967. DOI: 10.3390/en8087945
- [17] Dos Santos L.T., Sechilariu M., Locment F. Optimized load shedding approach for grid-connected DC microgrid systems under realistic constraints // Buildings. 2016. № 6 (4). Art. no. 50. DOI: 10.3390/buildings6040050
- [18] Sechilariu M., Locment F. Urban DC Microgrid: Intelligent Control and Power Flow Optimization. Butterworth-Heinemann, 2016. – 306 p.
- [19] Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Distribution DC electrical network with power router // proc. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Oct. 01-04, 2019, Vladivostok, Russia: IEEE, 2019. P. 1-5. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934898

- [20] Xu Y., Zhang J., Wang W., Juneja A., Bhattacharya S. Energy router: Architectures and functionalities toward Energy Internet // proc. 2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Oct. 17-20, 2011, Brussels: IEEE, 2011. P. 31-36. DOI: 10.1109/SmartGridComm.2011.6102340
- [21] Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Arsentiev G.O. Use of power routers and renewable energy resources in smart power supply systems // 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Oct., 2018, Chelyabinsk, Russia: IEEE, 2018. P. 143-148. DOI: 10.1109/URALCON.2018.8544289
- [22] She X., Huang A.Q., Burgos R. "Review of solid state transformer technologies and their applications in power distribution system". IEEE J. Emerg. Sel. Topics in Power Electron., vol. 1, no. 3, pp. 186-198, 2013. DOI: 10.1109/JESTPE.2013.2277917
- [23] Bansode S.G., Joshi P.M. Solid state transformers: new approach and new opportunity // proc. 11th IRF International Conference, June 15, 2014, Pune, India, pp. 15-21.
- [24] Nishi Y. Lithium ion secondary batteries; past 10 years and the future // Journal of Power Sources. 2001. № 100 (1-2). P. 101-106. DOI: 10.1016/S0378-7753(01)00887-4
- [25] Anderson P.M., Fouad A.A. Power System Control and Stability. 2nd ed. IEEE Press, 2003. – 688 p.
- [26] Bulatov Y., Kryukov A., Suslov K. Using group predictive voltage and frequency regulators of distributed generation plants in cyber-physical power supply systems // Energies. 2022. № 15 (4). DOI: 10.3390/en15041253

References

- [1] R. Bayindir, I. Colak, G. Fulli and K. Demirtas, "Smart grid technologies and applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 66, pp. 499-516, Dec. 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.002
- [2] F.N. Mohsen, M.S. Amin and H. Hashim, "Application of smart power grid in developing countries", in proc. *2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, June 3-4, 2013, Langkawi, Malaysia. DOI: 10.1109/PEOCO.2013.6564586
- [3] B.M. Buchholz and Z.A. Styczynski, *Smart Grids – fundamentals and technologies in electricity networks*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.
- [4] S.S. Bhalshankar and C.S. Thorat, "Integration of smart grid with renewable energy for energy demand management: Puducherry case study", in proc. *2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPES)*, Oct. 03-05, 2016, Paralakhemundi, India, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SCOPES.2016.7955498
- [5] Yu. Bulatov, A. Kryukov, V.H. Nguyen, D.H. Tran, "Fuzzy controller of rotation angle of blades of horizontal-axial wind power generation plant", *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 983, pp. 892-901, May 2019.
- [6] K. Suslov, N. Solonina and V. Stepanov, "A principle of power quality control in the intelligent distribution networks", in proc. *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)*, Sep. 08-11, 2015, Vienna, Austria, pp. 260-264. DOI: 10.1109/SEDST.2015.7315218

- [7] K.E. Antoniadou-Plytaria, I.N. Kouveliotis-Lysikatos, P.S. Georgilakis and N.D. Hatzigiorgiou, “Distributed and decentralized voltage control of smart distribution networks: models, methods, and future research”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2999-3008, Nov. 2017. DOI: 10.1109/TSG.2017.2679238
- [8] I. Colak, R. Bayindir and S. Sagiroglu, “The effects of the smart grid system on the national grids”, in proc. *2020 8th International Conference on Smart Grid (icSmart-Grid)*, Jun. 17-19, 2020, Paris, France, pp. 122-126. DOI: 10.1109/icSmartGrid49881.2020.9144891.
- [9] D. Olivares et al., “Trends in microgrid control”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905-1919, Jun. 2014. DOI: 10.1109/TSG.2013.2295514
- [10] F. Katiraei, M.R. Iravani and P. Lehn, “Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 248-257, Jan. 2005. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.835051
- [11] T. Sikorski and J. Rezmer, “Distributed generation and its impact on power quality in low-voltage distribution networks”, *Power Quality Issues in Distributed Generation*, J. Luszcz, London: InTech, 2015. DOI: 10.5772/61172
- [12] M.A. Aderibigbe, A.U. Adoghe, F. Agbetuyi and A.E. Aioboman, “Impact of distributed generations on power systems stability: A review”, in proc. *2022 IEEE Nigeria 4th International Conference on Disruptive Technologies for Sustainable Development (NIGERCON)*, Apr. 05-07, 2022, pp. 1-5. DOI: 10.1109/NIGERCON54645.2022.9803062
- [13] K. Venge et al., *Renewable Energy Sources: Theoretical Foundations, Technologies, Technical Characteristics, Economics*. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010.
- [14] O. Ellabban, H. Abu-Rub and F. Blaabjerg, “Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, pp. 748-764, Aug. 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.113
- [15] D. Chen, Y. Xu and A. Q. Huang, “Integration of DC microgrids as virtual synchronous machines into the AC grid”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 9, pp. 7455-7466, Sept. 2017. DOI: 10.1109/TIE.2017.2674621
- [16] M. Sechilariu, F. Locment and B. Wang, “Photovoltaic electricity for sustainable building. Efficiency and energy cost reduction for isolated DC microgrid”, *Energies*, vol. 8, no. 8, pp. 7945-7967, Jul. 2015. DOI: 10.3390/en8087945
- [17] L.T. dos Santos, M. Sechilariu and F. Locment, “Optimized load shedding approach for grid-connected DC microgrid systems under realistic constraints”, *Buildings*, vol. 6, no.4, art. no. 50, Dec. 2016. DOI: 10.3390/buildings6040050
- [18] M. Sechilariu and F. Locment, *Urban DC Microgrid: Intelligent Control and Power Flow Optimization*. Butterworth-Heinemann, 2016.
- [19] Yu.N. Bulatov and A.V. Kryukov, “Distribution DC electrical network with power router”, in proc. *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Oct. 01-04, 2019, Vladivostok, Russia, pp. 1-5. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934898
- [20] Y. Xu, J. Zhang, W. Wang, A. Juneja and S. Bhattacharya, “Energy router: Architectures and functionalities toward Energy Internet”, in proc. *2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Oct. 01-04, 2011, Brussels, pp. 31-36. DOI: 10.1109/SmartGridComm.2011.6102340

- [21] Yu.N. Bulatov, A.V. Kryukov and G.O. Arsentiev, "Use of power routers and renewable energy resources in smart power supply systems", in proc. *2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon)*, Oct. 17-20, 2018, Chelyabinsk, Russia, pp. 143-148. DOI: 10.1109/URALCON.2018.8544289
- [22] X. She, A.Q. Huang and R. Burgos, "Review of solid state transformer technologies and their applications in power distribution system", *IEEE J. Emerg. Sel. Topics in Power Electron*, vol. 1, no. 3, pp. 186-198, Sept. 2013. DOI: 10.1109/JESTPE.2013.2277917
- [23] S.G. Bansode and P.M. Joshi, "Solid state transformers: new approach and new opportunity", in proc. *11th IRF International Conference*, June 15, 2014, Pune, India, pp. 15-21.
- [24] Y. Nishi, "Lithium ion secondary batteries; past 10 years and the future", *Journal of Power Sources*, vol. 100 (1-2), pp. 101-106, Nov. 2001. DOI: 10.1016/S0378-7753(01)00887-4
- [25] P.M. Anderson and A.A. Fouad, *Power System Control and Stability*. 2nd ed. IEEE Press, 2003.
- [26] Y. Bulatov, A. Kryukov and K. Suslov, "Using group predictive voltage and frequency regulators of distributed generation plants in cyber-physical power supply systems", *Energies*, vol. 15, no. 4, Feb. 2022. DOI: 10.3390/en15041253

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Булатов Юрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент Братского государственного университета, Братск, Российская Федерация.

Yuri N. Bulatov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Bratsk State University, Bratsk, Russian Federation.

Крюков Андрей Васильевич, доктор технических наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, Иркутск, Российская Федерация.

Andrey V. Kryukov, D. Sci. (Eng.), professor of the Irkutsk State Transport University; professor of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation.

Суслов Константин Витальевич, доктор технических наук, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, Иркутск, Российская Федерация.

Konstantin V. Suslov, D. Sci. (Eng.), professor of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation.

УДК 621.311.001.57

DOI 10.46960/2658-6754_2023_1_85

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ИСТОЧНИКОМ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

М.И. Тошходжаева

ORCID: 0000-0001-9973-8387 e-mail: shukrona14_01_2011@mail.ru

Политехнический институт Таджикского технического университета

им. акад. М.С. Осими

Худжанд, Таджикистан

В статье приведен анализ состояния электроэнергетической системы, основные параметры которой изменяются при вводе дополнительного источника распределенной генерации на основе ветропарка мощностью 9 МВА. Составлена структурная схема и на ее основе – имитационная модель энергосистемы. Поскольку от надежной работы противоаварийной автоматики зависит устойчивость электроэнергетической системы, необходимо определить значения основных параметров электроэнергетической системы, которые характеризуют ее устойчивое функционирование: изменение угла фазового сдвига между ЭДС генератора и напряжением сети и изменение основных электрических величин на зажимах источника потребителя. Проведен анализ значений параметров, которые получены в результате имитационного моделирования в среде *Matlab* в нормальном режиме функционирования электроэнергетической системы с источником распределенной генерации на примере реальной системы электроснабжения промышленной зоны г. Гулистон Согдийской области. В имитационной модели короткое замыкание рассматривается на шинах потребителя 10 кВ. Новизна исследования заключается в компьютерном моделировании системы электроснабжения энергорайона с горнодобывающей промышленностью в нормальном режиме с источником распределенной генерации, а также в исследовании устойчивости электроэнергетической системы.

Ключевые слова: источник распределенной генерации, моделирование, промышленная зона, устойчивость электроэнергетической системы, энергосистема.

Для цитирования: Тошходжаева М.И. Моделирование основных параметров электроэнергетической системы с источником распределенной генерации при различных режимах // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 1. С. 85-101. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_85

SIMULATION OF MAIN PARAMETERS OF ELECTRIC POWER SYSTEM WITH DISTRIBUTED GENERATION SOURCE UNDER DIFFERENT MODES

M.I. Toshkhodzhaeva

ORCID: 0000-0001-9973-8387 e-mail: shukrona14_01_2011@mail.ru

Polytechnic Institute of the Tajik Technical University n.a. academician M.S. Osimi
Khudjand, Tajikistan

Analysis and modeling of the main parameters of an electric power system with a distributed generation source in normal mode using the Matlab application program. The article provides an analysis of the state of the electric power system, the main parameters of which change when an additional source of distributed generation based on a wind farm with a capacity of 9 MVA is introduced. A block diagram and simulation model of power system have been compiled. Since the stability of the electric power system depends on the reliable operation of emergency automatics, it is necessary to determine the values of the main parameters of the electric power system that characterize its stable operation: a change in the phase shift angle between the generator EMF and the mains voltage and a change in the main electrical quantities at the terminals of the consumer source. The analysis of the values obtained in Matlab simulation in the normal mode of operation of the electric power system with a distributed generation source was carried out using the example of a real power supply system of the industrial zone of the city of Guliston, Sughd Region. In the simulation model, a short circuit is considered on the 10 kV consumer buses. The novelty of the study lies in the computer simulation of the power supply system of the energy district with the mining industry in normal mode with a distributed generation source, as well as in power system stability studies.

Key words: distributed generation, modeling, industrial zone, power system stability, power system.

For citation: M.I. Toshkhodzhaeva, "Simulation of main parameters of electric power system with distributed generation source under different modes", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 85-101, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_85

I. Введение

В настоящее время во многих странах широкое применение получили объекты распределенной генерации (РГ), которые функционируют как изолированно, так и совместно с электроэнергетической системой. В России наибольшее распространение получили системы РГ на основе газотурбинных, газопоршневых и дизельных установок, а в европейских странах, с учетом технологических требований и экологических стандартов, используются ветряные, солнечные и приливно-отливные источники РГ [1-3].

С учетом зарубежного опыта (Китай, Россия, Дания) и природно-географических возможностей внедрение и развитие малых источников РГ является приоритетным направлением в электроэнергетической системе Республики Таджикистан. Однако при эксплуатации энергосистем с источниками РГ возникают определенные проблемы, связанные с обеспечением устойчивости системы и поддержанием параметров электроэнергетических систем (ЭЭС) в пределах, регламентированных ГОСТ. Данная проблема является актуальной в условиях Согдийской области Республики Таджикистан, поскольку данный регион характеризуется достаточным количеством потребителей промышленного характера, в том числе, в горнодобывающей отрасли (энергоемкие потребители), но отсутствуют мощные источники электроэнергии (помимо Кайраккумской ГЭС). Данная электростанция обеспечивает всего треть потребителей региона, остальные получают питание от Нурекской ГЭС по линии электропередачи Юг-Север, напряжением в 500 кВ. Следовательно, внедрение источников РГ непосредственно вблизи потребителей будет способствовать уменьшению потерь электроэнергии в системе, бесперебойной подаче электроэнергии и частичной ликвидации дефицита мощности, особенно в зимний период.

Несмотря на множество исследований в области имитационного моделирования ЭЭС с источниками РГ, в них практически не учитывается характер и специфика потребителей, его изменение в течение определенного времени и структура нагрузок [4-7]. Проблема заключается в том, что от характера электрических нагрузок зависит изменение параметров ЭЭС в различных режимах функционирования.

Ввиду сложности режимов электроэнергетической системы, переходные режимы трудно исследовать традиционным аналитическим методом. Во-первых, расчеты могут иметь относительно большие погрешности. Во-вторых, не показывается фактическое состояние системы в течение всего времени переходного процесса. Поэтому необходимо соответствующее компьютерное моделирование системы, которое адекватно отражает состояние системы, особенно переходные режимы как на зажимах источника, так и на зажимах у потребителей.

Новизна данного исследования заключается в том, что разработана имитационная модель ЭЭС с источником РГ энергорайона горнодобывающей промышленности с высоким удельным весом постоянной нагрузки (условно-постоянная нагрузка) в среде *Matlab*, которая с достаточной точностью отражает состояние ЭЭС. Отличительная особенность рассмотренных энергорайонов заключается в том, что электрическая нагрузка в них имеет сосредоточенный характер, график нагрузки в течение суток относительно равномерный. Однако прекращение подачи электроэнергии в этом секторе влечет за собой значительный материальный ущерб и представляет

опасность для жизни персонала. В этих условиях устройство РГ необходимо для обеспечения электроэнергией особо важных приемников электроэнергии как в нормальном, так и в аварийном режимах ЭЭС.

Результаты моделирования можно использовать для точного подбора соответствующей противоаварийной автоматики и уставок релейной защиты, коммутационной аппаратуры и т.д., поскольку с вводом дополнительных источников происходит реорганизация системы.

II. Методы исследования

Принципы анализа совместной работы энергосистемы и систем РГ рассмотрены на примере ЭЭС, которая состоит из источника питания, мощностью (синхронный генератор) 171 МВА с устройством АВР и без него, повышающего трансформатора мощностью 140 МВА напряжением 10/110 кВ, воздушной линии электропередачи (ВЛЭП) протяженностью 11,4 км, поперечным сечением АС-95 мм², двух понижающих трансформаторов, мощностью 16 МВА напряжением 110/35/10 кВ (в модели отражено как подсистема), 25 МВА напряжением 110/35 кВ. К шинам напряжения потребителя подключен парк ветровой электростанции мощностью 9 МВА.

Моделирование проводится в программной среде *Matlab/Simulink*. Поскольку в имитационной модели применяется синхронный генератор зарубежного производства, его характеристики отличаются от аналогичных генераторов отечественного производства, на выходе генератор выдает 20 кВ вместо 10 кВ. Следует отметить, что электрическая нагрузка на стороне низкого напряжения условно не меняется. К нагрузкам, которые остаются относительно постоянными, можно отнести энергорайоны с горнодобывающей промышленностью, электродуговые сталеплавильные печи и шахты по добыче угля. На территории Согдийской области к таким секторам принадлежат предприятия, расположенные на территории г. Гулистон. Изменение основных параметров ЭЭС рассмотрены в нормальном и аварийном режимах с устройством АВР у основного генератора и без него. В данной схеме короткое замыкание происходит на шинах 10 кВ потребителя электроэнергии.

Синхронный генератор моделировался блоком пакета *SymPowerSystem-Synchronous Machine*. Модель гидротурбины описывается дифференциальным уравнением:

$$T_{\Gamma} \frac{dP_{\Gamma}}{dt} + P_{\Gamma} = \mu, \quad (1)$$

где P_{Γ} – мощность гидротурбины; μ – открытие регулирующего органа; T_{Γ} – постоянная времени гидротурбины [8-10].

Система возбуждения гидрогенератора моделируется аperiodическим звеном первого порядка с передаточной функцией [11-13]:

$$\frac{1}{0,03s + 1} \quad (2)$$

Для повышения устойчивости генератора в модели использовано устройство автоматического регулирования возбуждения (АРВ), структурная схема *Simulink*-модели приведена на рис. 1.

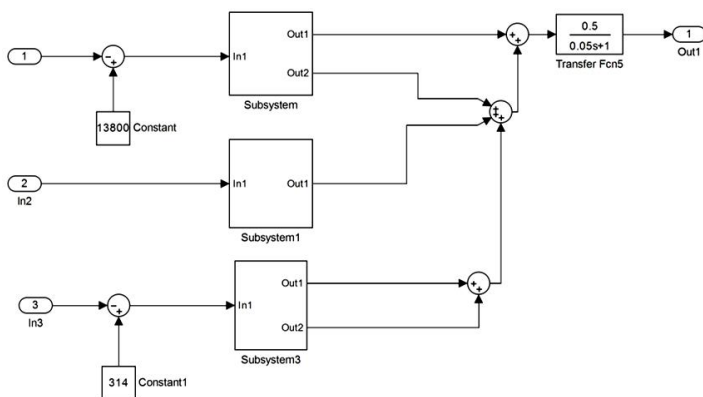


Рис. 1. Схема *Simulink* модели устройства АРВ

Fig. 1. Scheme of *Simulink* model of automatic voltage regulator (AVR) device

Структурная схема энергорайона горнодобывающей промышленности с источником РГ приведена на рис. 2. На основе структурной схемы электроснабжения составлена имитационная модель системы электроснабжения (рис. 3). Для этой цели использованы элементы из библиотеки *Simulink* и элементы, моделирующие процессы в ЭЭС из библиотеки *SimPowerSystem*.

В модели приведены контрольно-измерительные приборы, которые предназначены для контроля и фиксации механических и электрических параметров ЭЭС [14]. Между генератором и трансформатором расположен комплект измерительных приборов, основным назначением которых является контроль изменения электрических и механических параметров на зажимах основного генератора. На выходе понижающих трансформаторов

также подключены контрольно-измерительные приборы. На стороне среднего напряжения подключен парк ветрогенераторов, мощностью 9 МВА. Модель разработана Р. Ридом, Б. Солнье, и Р. Ганьоном. Использован индукционный генератор с двойным питанием. В ветряных турбинах используется асинхронный генератор с двойным питанием (*DFIG*), состоящий из асинхронного генератора с фазным ротором и ШИМ-преобразователя переменного/постоянного тока на основе *IGBT*. Технология *DFIG* позволяет извлекать максимальную энергию из ветра при его малых скоростях за счет оптимизации скорости вращения турбины, минимизируя при этом механические нагрузки на турбину при порывах ветра. Оптимальная скорость турбины, производящая максимальную механическую энергию для данной скорости ветра, пропорциональна скорости ветра [15]. Разработанная модель предназначена для автономных энергосистем, где основным источником является ветроустановка. В предложенной имитационной модели система питается как от основного источника, так и от ветроустановки, т.е. ЭЭС является комбинированной.

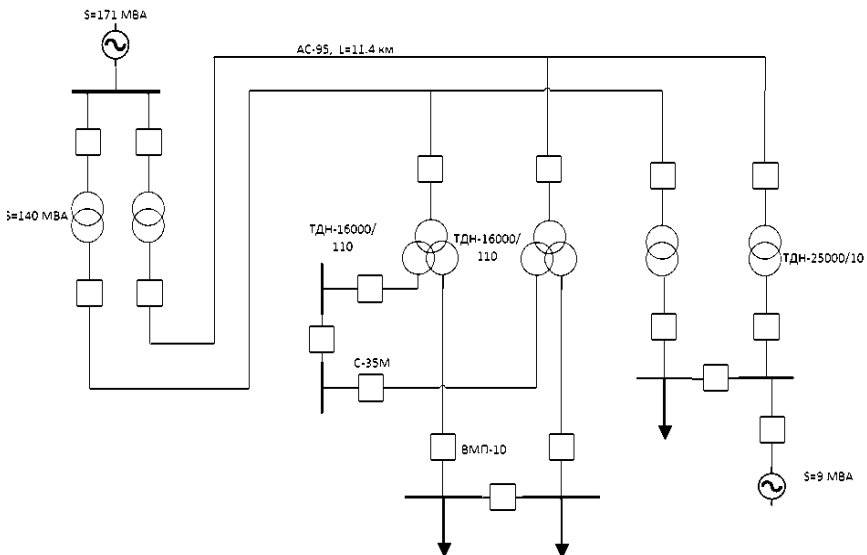


Рис. 2. Структурная схема энергорайона горнодобывающей промышленности с источником РГ

Fig 2. Structural diagram of the energy district of the mining industry with a distributed generation (DG) source

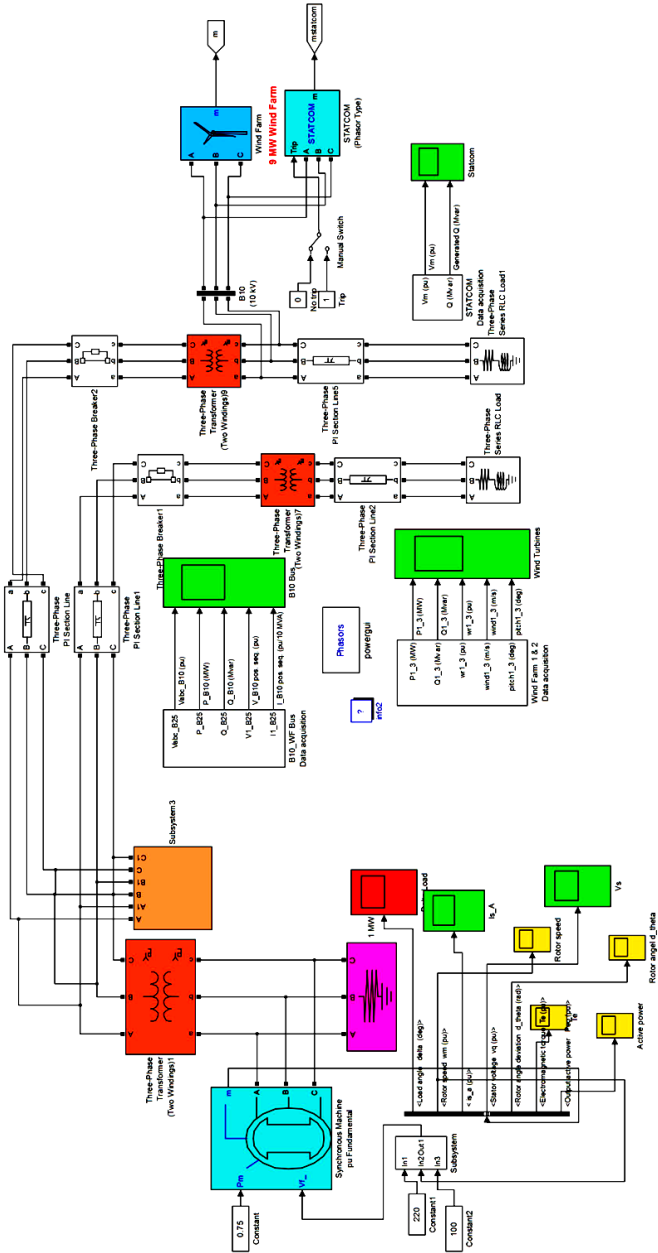


Рис. 3. Имитационная модель ЭЭС энергорайона горнодобывающей промышленности с источником РГ (ветропарк)

Fig. 3. Simulation model of the electric power system of the energy district of the mining industry with a distributed generation source (wind farm)

Условно принято, что основной генератор запускается первым, и после вхождения его в зону синхронизма запускается ветроустановка с последующей синхронизацией с энергосистемой. Замеры произведены на шинах основного генератора и шинах потребителя электроэнергии. Для верификации модели ветроустановки использовались многолетние наблюдения изменения скорости ветра в г. Гулистане Согдийской области [16]. Модель ЭЭС полностью соответствует существующей схеме электроснабжения г. Гулистана.

Для данной системы электроснабжения исследованы следующие режимы работы:

- 1) нормальный режим энергосистемы с устройством АРВ основного генератора и без него;
- 2) аварийный режим энергосистемы с устройством АРВ основного генератора и без него.

Предполагается, что трехфазное короткое замыкание возникает на зажимах потребителя энергосистемы.

Основными параметрами, которые характеризуют устойчивость ЭЭС, являются: изменение угла ЭДС генератора и напряжения сети, изменение напряжения на выходе генератора, изменение напряжения на шинах потребителя в нормальном и аварийном режимах [17, 18].

III. Результаты моделирования

Нормальный режим энергосистемы с устройством АРВ основного генератора и без АРВ.

Одним из основных параметров, характеризующих устойчивость энергосистемы, является изменение угла фазового сдвига между ЭДС генератора и напряжением сети (рис. 4).

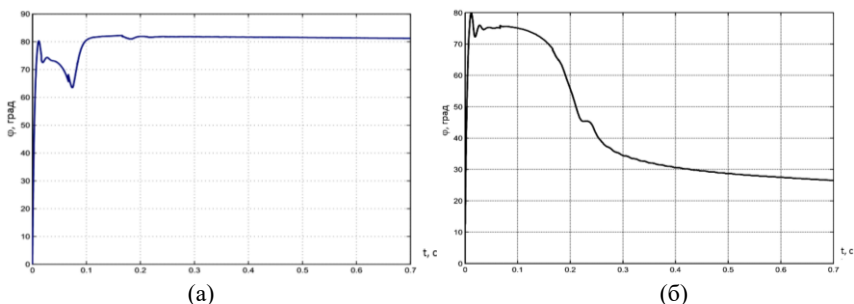


Рис. 4. Изменение угла фазового сдвига между ЭДС генератора и напряжением сети: с АРВ (а) и без АРВ (б)

Fig. 4. Changing the angle of the phase shift between the generator EMF and the mains voltage: with AVR (a) and without AVR (b)

В нормальном режиме с устройством АРВ (рис. 4, а) на графике выделяются три отрезка времени, соответствующие трем режимам функционирования ЭЭС. В течение 0,01 с происходит пуск всей системы, переходной процесс заканчивается через 0,2 с, и ротор основного источника питания совершает колебание устойчивого значения, которое равно 80° .

В нормальном режиме без устройства АРВ (рис. 4, б) наблюдается скачкообразный рост изменения угла фазового сдвига между ЭДС генератора и напряжением сети в течение 0,1 с, после чего происходит спад до минимальных значений. Следовательно, в нормальном режиме ротор основного источника питания совершает колебание неустойчивого значения угла, равного 30° , что может привести к нарушению синхронной работы генератора. При этом угол сдвига имеет убывающий характер.

Другим показателем устойчивости ЭЭС является изменение напряжения на выходе основного генератора в нормальном режиме с устройством АРВ основного генератора и без него (рис. 5).

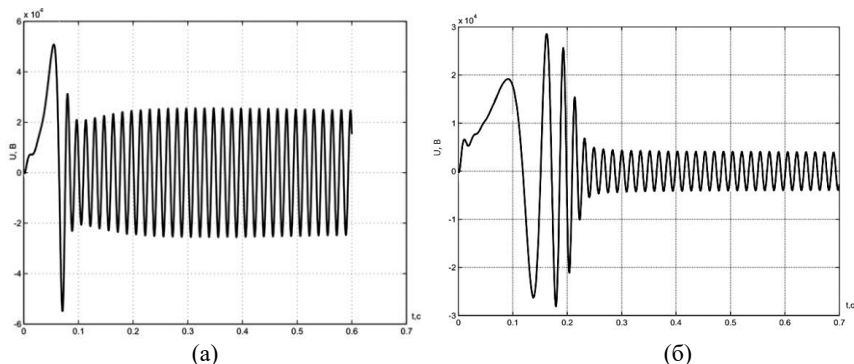


Рис. 5. Изменение напряжения на выходе основного генератора в нормальном режиме: с АРВ (а) и без АРВ (б)

Fig. 5. Changing the voltage at the output of the main generator in normal mode: with AVR (a) and without AVR (b)

По данным рис. 5, а можно сделать следующие выводы: в нормальном режиме при пуске основного источника питания значение напряжения на выходе основного генератора в течение 0,07 с возрастает до максимального значения в 50 кВ, которое длится до 0,1 с. По мере синхронизации основного источника значение напряжения равняется расчетным значениям 20 кВ. Следует отметить, что основной генератор выдает напряжение 20 кВ, имеющее синусоидальный характер, которое с помощью трансформатора преобразуется в 110 кВ и транспортируется по энергосистеме.

При запуске модели без устройства АРВ (рис. 5, б) выделяются три характерных отрезка времени, соответствующих времени переходного процесса. В течение 0,1 с наблюдается увеличение напряжения до 20 кВ, после чего происходит резкое возрастание до максимального значения в 30 кВ. Поскольку регулировка возбуждения основного генератора отсутствует, по мере вхождения в зону синхронизма, напряжение достигает значения 5 кВ и остается стабильным.

Как отмечалось выше, от изменения напряжения на зажимах приемника, в целом зависит исправная работа электрооборудования. На рис. 6 представлен график изменения напряжения на шинах потребителя с устройством АРВ основного генератора и без него.

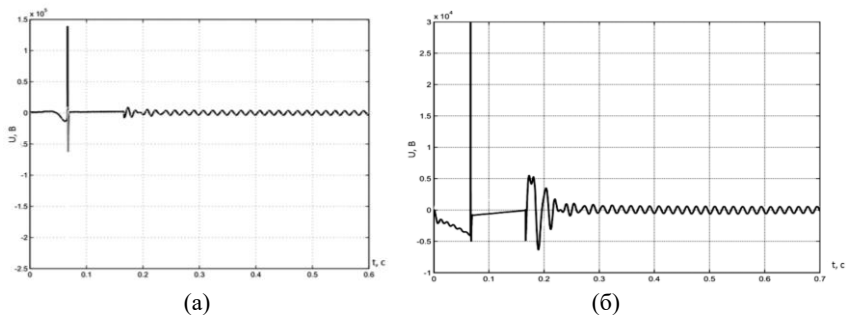


Рис. 6. Изменение напряжения на шинах потребителя с АРВ основного генератора (а) и без АРВ (б)

Fig. 6. Changing the voltage on the consumer's buses with the AVR device of the main generator (a) and without AVR (b)

Из рис. 6, а видно, что в течение 0,07 с напряжение фактически равно 0, после чего следует скачкообразный рост до 150 кВ, с последующим спадом до 0 в течение 0,18 с. По окончании переходного процесса значение напряжения становится номинальным, равным 35 кВ и приобретает синусоидальную форму.

Из рис. 6, б следует, что при отсутствии устройства АРВ значение напряжения в течение 0,7 с имеет отрицательное значение, равное 0,5 кВ с последующим скачкообразным ростом до 30 кВ и резким спадом до 0. Затем, в течение 0,18 с напряжение остается равным 0, затем происходит возрастание напряжения до 5 кВ с последующим спадом до значения, равного 3 кВ.

Аварийный режим работы энергосистемы с устройством АРВ основного генератора и без АРВ.

Как отмечалось выше, трехфазное короткое замыкание происходит на шинах потребителя, поэтому его влияние на исправное функционирование основного генератора является минимальным. Исходя из этого, в аварийном режиме рассмотрены значения изменения напряжений и токов на стороне потребителя. На рис. 7 показано изменение напряжения на шинах потребителя в аварийном режиме.

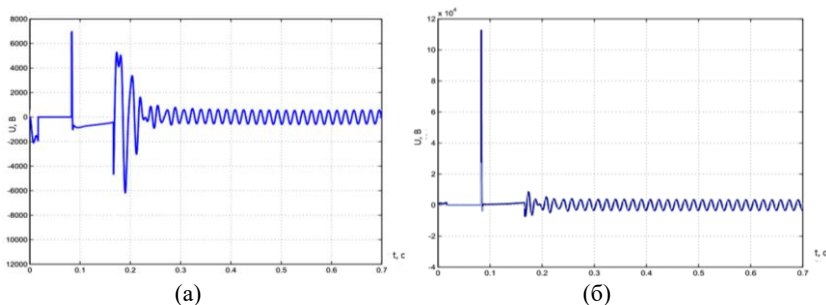


Рис. 7. Изменение напряжения на шинах потребителя в аварийном режиме: с APB (а) и без APB (б)

Fig. 7. Change in voltage on the consumer's buses in emergency mode: with AVR (a) and without AVR (b)

На рис. 7, а отчетливо прослеживаются четыре отрезка времени, характерные для переходных режимов. В момент запуска модели, значение напряжения имеет отрицательный характер и в течение 0,03 с равно 2 кВ, после чего, напряжение равняется 0 с последующим спадом до 1 кВ. Далее наблюдаем скачкообразное возрастание напряжения до 7 кВ, которое имеет аperiodический характер. По мере завершения переходного процесса напряжение принимает форму синусоиды и равно 0,6 кВ.

В отличие от предыдущего графика, на рис. 7, б изменение напряжения в течение 0,09 с практически равно нулю, после чего наблюдается скачкообразный рост напряжения до 120 кВ с последующим спадом в течение 0,09 с до нуля. В процессе завершения переходного процесса напряжение равно 0,6 кВ.

На рис. 8 показано изменение тока на шинах потребителя в аварийном режиме. Из представленного графика на рис. 8, а следует, что в момент пуска в течение 0,09 с значение тока возрастает до максимального значения 6,1 кА с последующим спадом до нуля в течение 0,09 с, после чего значение тока равняется нулю в течение 0,1 с. По завершении переходного процесса величина тока изменяется по закону синусоиды, и его значение равно 3 кА.

Из графика, показанного на рис. 8, б, видно, что в момент пуска величина тока в течение 0,9 с достигает значения 1 кА и остается практически

стабильным, после чего в течение 0,03 с наблюдается аperiodический спад значений тока до нуля, остающийся неизменным в течение 0,1 с. Далее наблюдаем, что значение тока возрастает до максимального значения 4 кА, которое затем постепенно уменьшается до 500 А.

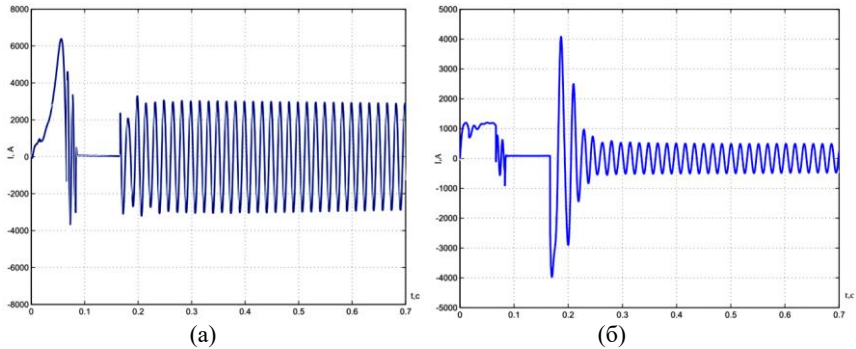


Рис. 8. Изменение тока на шинах потребителя в аварийном режиме: с АРВ (а) и без АРВ (б)

Fig. 8. Change in current on the consumer's buses in emergency mode: with AVR (a) and without AVR (b)

IV. Выводы

На основе средств пакета *MATLAB/Simulink* разработана имитационная модель энергосистемы с источником распределенной генерации энерго района горной промышленности, в состав которого входят основной источник синхронный генератор, мощностью 171 МВА и ветропарк, мощностью 9 МВА, который характеризуется относительно постоянной нагрузкой.

Результаты моделирования показали, что угол сдвига фаз между ЭДС генератора и напряжения сети в нормальном и аварийном режимах практически одинаковы, поскольку трехфазное короткое замыкание возникает на шинах потребителей электроэнергии. Установлено, что при наличии устройства АРВ переходной процесс завершается через 0,2 с после запуска модели, а ротор основного источника питания совершает колебание устойчивого значения, которое равно 80° . В отличие от предыдущего режима, при отсутствии устройства АРВ зафиксирован скачкообразный рост угла с последующим спадом до минимального значения, который имеет убывающий характер, равный 30° . Следовательно, при моделировании ЭЭС с устройством РГ, независимо от характера нагрузки, установка устройств АРВ является необходимым элементом для поддержания устойчивости энергосистемы.

Поскольку коммутационные аппараты, устройства защиты и противоаварийной автоматики выбираются по номинальному напряжению, характер его изменения во времени на зажимах генератора имеет большое значение. В нормальном режиме с устройством АРВ напряжение в течение 0,07 с достигает максимального значения в 50 кВ, по мере завершения переходного процесса оно становится равным расчетным значениям 20 кВ. При запуске модели без устройства АРВ в течение 0,1 с наблюдаем увеличение напряжения до 20 кВ, после чего происходит резкое возрастание до максимального значения в 30 кВ. Поскольку регулировка возбуждения основного генератора отсутствует, по мере вхождения в зону синхронизма напряжение достигает 5 кВ и остается стабильным. При таком напряжении нормальное функционирование потребителей является невозможным.

Напряжение на зажимах потребителей при запуске модели в нормальном режиме с устройством АРВ в течение 0,07 с фактически равно нулю, после чего следует скачкообразный рост до 150 кВ, с последующим спадом до нуля в течение 0,18 с. По окончании времени переходного процесса, значение напряжения становится номинальным, равным 35 кВ и принимает синусоидальную форму. В случае отсутствия устройства АРВ, после завершения переходного процесса напряжение равняется 3 кВ, поэтому, как и предыдущем случае, нормальное функционирование электрооборудования невозможно.

В отличие от первого варианта, в аварийном режиме изменение напряжения местами имеет отрицательный характер, что свидетельствует о том, что в системе возникают обратные перетоки. Значение напряжения на шинах потребителя в установившемся режиме равно 0,6 кВ. В режиме, когда отсутствует устройство АРВ у основного генератора, в начальный момент напряжение равно 120 кВ, что весьма опасно для изоляторов и коммутационных аппаратов.

В аварийном режиме значение тока равно максимальному значению 6,1 кА с последующим спадом до нуля в течение 0,09 с. Значение тока равняется нулю в течение 0,1 с. По завершению переходного процесса величина тока изменяется по закону синусоиды, и его значение равно 3 кА. При отсутствии устройства АРВ, в момент пуска значение тока в течение 0,9 с возрастает до 1 кА и это значение практически остается стабильным. Затем наблюдается аperiодический спад значений тока до нуля в течение 0,03 с, оставаясь неизменным в течение 0,1 с, после чего значение тока возрастает до максимального значения 4 кА, затем постепенно уменьшаясь до 500 А.

Результаты моделирования показали, как в системах с источниками РГ протекают реверсивные перетоки и возникает проблема усиления изоляции от перенапряжений, имеющих место в переходных режимах. Поскольку

предыдущая система не рассчитана на такие режимы, возникает необходимость разработки дополнительных мер по обеспечению электробезопасности сети и выбора соответствующих коммутационных аппаратов.

Результаты исследования приведены в виде изменения основных параметров энергосистемы в течение времени. Все исследованные в модели параметры соответствуют допустимым значениям, поскольку во всех осциллограммах переходной процесс заканчивается через 0,2 с после пуска системы.

Анализ состояния электроэнергетической системы показал, что дополнительные источники, которые способствуют покрытию дефицита активной и реактивной мощности, с другой стороны, усложняют управление электроэнергетической системой и отстройку релейной защиты и автоматики. Поскольку при введении дополнительных источников изменяются направления потока активной и реактивной мощности в энергосистеме, требуется пересмотреть уставки защит на всех участках сети и разработать новые методики их выбора с учетом систем РГ.

Обеспечение баланса мощности в системах с источниками РГ является важным моментом, поскольку источники РГ в основном подключаются на стороне низкого, в крайнем случае, на стороне среднего напряжения и транспортировка в другие энергосистемы с экономической точки зрения является нецелесообразным.

Таким образом, подключение источников РГ в энергосистему требует тщательного расчета по всем показателям и параметрам, поскольку мероприятия по их подключению, особенно технические, связаны с дополнительными капиталовложениями, которые, возможно, не сможет компенсировать доход от выработки электроэнергии дополнительными источниками.

© Тошходжаева М.И., 2022

Поступила в редакцию 28.06.2022

Received 28.06.2022

Библиографический список

- [1] Куликов А.Л., Осокин В.Л., Папков Б.В. Проблемы и особенности распределенной электроэнергетики // Вестник НГИЭИ. 2018. № 11 (90). С. 123-136.
- [2] Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 6. С. 38-51.
- [3] Рахимов О.С., Тошходжаева М.И. Распределенная генерация на основе возобновляемых источников энергии и перспективы их применения // Информацион-

- ные технологии в электротехнике и электроэнергетике, Июнь 05, 2020, Чебоксары, Россия: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2020. С. 345-348.
- [4] Гордиевский Е.М., Мирошниченко А.А., Кулганатов А.З., Соломин Е.В., Станчаускас В.И. Имитационное моделирование ветроэнергетической установки в программе Matlab/Simulink // Известия Высших Учебных Заведений. Северо-Кавказский Регион. Технические Науки. 2020. № 1 (205). С. 25-32. DOI: 10.17213/1560-3644-2020-1-25-32
- [5] Амер Р., Денисов Р.С. Моделирование автономных энергокомплексов на основе ВИЭ для изолированных потребителей в среде MATLAB SIMULINK // Вестник аграрной науки Дона. 2017. № 3 (39). С. 11-20.
- [6] Тошходжаева М.И. Перспективы применения источников распределенной генерации в Республике Таджикистан // Вестник ПИТГУ имени академика М.С. Осими. 2019. № 2 (11). С. 43-50.
- [7] Gracheva E.I., Naumov O.V. Estimation of Power Losses in Electric Devices of the Electrotechnical Complex // proc. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019, Mar. 25-29, 2019, Sochi, Russia: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 8742923. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8742923
- [8] Perelmuter V.M. Electrotechnical systems: Simulation with Simulink and SimPowerSystems. Boca Raton, FL: CRC Press, 2017. – 450 p.
- [9] Кушнерев А.А., Алюнов А.Н. Структурное моделирование и анализ статической устойчивости электроэнергетических систем // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. 2018. №. 2 (2). С. 34-40.
- [10] Суворов А.А., Аскарлов А.Б., Андреев М.В., Рудник В.Е. Верификация расчетов динамической устойчивости энергорайонов с распределенными генерирующими объектами // Электрические станции. 2021. №. 10 (1083). С. 12-25. DOI: 10.34831/EP.2021.1083.10.003
- [11] Куликов А.Л., Илюшин П.В. Статистические методы оценки параметров аварийного режима энергорайонов с объектами распределенной генерации // Электричество. 2019. №. 5. С. 4-11. DOI: 10.24160/0013-5380-2019-5-4-11
- [12] Lisin E., Shuvalova D., Volkova I., Strielkowski W. Sustainable development of regional power systems and the consumption of electric energy // Sustainability. 2018. № 10 (4). P. 1111. DOI: 10.3390/su10041111
- [13] Todorov G.N., Vlasov A.I., Volkova E.E., Osintseva M.A. Sustainability in local power supply systems of production facilities where there is the compensatory use of renewable energy sources // International Journal of Energy Economics and Policy. 2020. № 10 (3). P. 14-23. DOI: 10.32479/ijeeep.8960
- [14] Honrubia-Escribano A., Gomez-Lazaro E., Fortmann J., Sorensen P. Generic dynamic wind turbine models for power system stability analysis: A comprehensive review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. № 81 (12). P. 1939-1952. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.005
- [15] Farrokhhabadi M. [et al.]. Microgrid stability definitions, analysis, and examples // IEEE Transactions on Power Systems. 2020. № 35 (1). P. 13-29. DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2925703

- [16] Илюшин П.В., Березовский П.К. Подходы к формированию технических требований по участию объектов распределенной генерации в регулировании напряжений в энергосистеме // Энергетик. 2019. № 3. С. 12-18.
- [17] Рид Р. Ветряной двигатель асинхронный генератор в изолированной сети [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.exponenta.ru/R2019a/physmod/sps/examples/wind-turbine-asynchronous-generator-in-isolated-network.html> (дата обращения 22.05.2022).
- [18] Махмадалиев Б.У. Национальный план действий Республики Таджикистан по смягчению последствий изменений климата. Душанбе: Таджикгидромет, 2003. – 264 с.

References

- [1] A.L. Kulikov, V.L. Osokin and B.V. Papkov, “The problems and peculiarities of distributed electricity”, *Bulletin of the NGIEI*, no. 11 (90), pp. 123-136, 2018.
- [2] S.G. Obukhov and I.A. Plotnikov, “Simulation model of operation of autonomous photovoltaic plant under actual operating conditions”, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, vol. 328, no. 6, pp. 38-51, 2017.
- [3] O.S. Rakhimov and M.I. Toshkhodzhaeva, “Raspredelennaya generaciya na osnove vozobnovlyaemyh istochnikov energii i perspektivy ih primeneniya [Distributed generation based on renewable energy sources and prospects for their application]”, in proc. *Informacionnye tekhnologii v elektrotehnike i elektroenergetike [Information technologies in electrical engineering and power industry]*, Jun. 05, 2020, Cheboksary, Russia, pp. 345-348 (in Russian).
- [4] E.M. Gordievsky, A.A. Miroshnichenko, A.Z. Kulganatov, E.V. Solomin and V.I. Stanchauskas, “Simulation of a wind power engineering Matlab/Simulink installations”, *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*, vol. 1, no. 205, pp. 25-32, 2020.
DOI: 10.17213/1560-3644-2020-1-25-32
- [5] R. Amer and R.S. Denisov, “Modelirovanie avtonomnyh energokompleksov na osnove VIE dlya izolirovannyh potrebitelej v srede MATLAB SIMULINK [Modeling of autonomous energy complexes based on RES for isolated consumers in the MATLAB SIMULINK]”, *Don Agrarian Science Bulletin*, vol. 3, no. 39, pp. 11-20, 2017 (in Russian).
- [6] M.I. Toshhojaeva, “Prospects for application of sources of distributive generation in the Republic of Tajikistan”, *Bulletin of PITTU*, vol. 2, no. 11, pp. 43-50, 2019.
- [7] E.L. Gracheva and O.V. Naumov, “Estimation of Power Losses in Electric Devices of the Electrotechnical Complex”, in proc. *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019*, Mar. 25-29, 2019, Sochi, Russia, pp. 8742923. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8742923
- [8] V.M. Perelmuter, *Electrotechnical systems: Simulation with Simulink and SimPowerSystems*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2017.
- [9] A.A. Kushnerev and A.N. Alyunov, “Structural modeling and analysis of electric power systems static stability”, *Bulletin of the Vologda State University. Series: Engineering Sciences*, vol. 2, no. 2, pp. 34-40, 2018.

- [10] A.A. Suvorov, A.B. Askarov, M.V. Andreev and V.E. Rudnik, “Verification of calculations of the dynamic stability of energy areas with distributed generation units”, *Electrical Stations*, vol. 10, no. 1083, pp. 12-25, 2021. DOI: 10.34831/EP.2021.1083.10.003
- [11] A.L. Kulikov and P.V. Ilyushin, “The statistical methods to estimation of emergency operation mode parameters of energydistricts with the objects of up-diffused generation”, *Electricity*, no. 5, pp. 4-11, 2019. DOI: 10.24160/0013-5380-2019-5-4-11
- [12] E. Lisin, D. Shuvalova, I. Volkova and W. Strielkowski, “Sustainable development of regional power systems and the consumption of electric energy”, *Sustainability*, vol. 10, no. 4, pp. 1111, 2018. DOI: 10.3390/su10041111
- [13] G.N. Todorov, A.I. Vlasov, E.E. Volkova and M.A. Osintseva, “Sustainability in local power supply systems of production facilities where there is the compensatory use of renewable energy sources”, *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 10, no. 3, pp. 14-23, 2020. DOI: 10.32479/ijeeep.8960
- [14] A. Honrubia-Escribano, E. Gomez-Lazaro, J. Fortmann and P. Sorensen, “Generic dynamic wind turbine models for power system stability analysis: A comprehensive review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, no. 12, pp. 1939-1952, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.005
- [15] M. Farrokhhabadi et al., “Microgrid stability definitions, analysis, and examples”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 13-29, Jan. 2019. DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2925703
- [16] P.V. Ilyushin and P.K. Berezovsky, “Approaches to establishing voltage control requirements for distributed generation units”, *Energetik*. no. 3, pp. 12-18, 2019.
- [17] R. Reed, *Vetryanoy dvigatel' asinhromnyj genetor v izolirovannoy seti [Wind turbine asynchronous generator in an isolated network]*, [Online]. Available at: <https://docs.exponenta.ru/R2019a/physmod/sps/examples/wind-turbine-asynchronous-generator-in-isolated-network.html> [Accessed: May 22, 2022] (in Russian).
- [18] B.U. Mahmataliev, *Nacional'nyj plan dejstvij Respubliki Tadzhhikistan po smyagcheniyu posledstvij izmenenij klimata [National Action Plan of the Republic of Tajikistan on Climate Change Mitigation]*. Dushanbe: Tajikglavgidromet, 2003 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Тошходжаева Мухайе Исломовна, кандидат технических наук, и.о. доцента Политехнического института Таджикского технического университета им. академика М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан.

Muhayo I. Toshkhodzhaeva, Cand. Sci. (Eng.), acting associate professor of the Polytechnic Institute of the Tajik Technical University n.a. academician M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ДВУХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА БАЗЕ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Т.Г. Климова

ORCID: 0000-0002-0219-7770 e-mail: tgklim@mail.ru
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Россия

В.С. Смирнов

ORCID: 0000-0002-8655-405X e-mail: smirnovvs.21@gmail.com
НТЦ Механотроника
Санкт-Петербург, Россия

В статье рассмотрена модель двухобмоточного трансформатора, разработанная в графической среде имитационного моделирования *Simulink*. Актуальность работы определяется тем, что неожиданный отказ силового трансформатора может привести к значительным затратам на ремонт и финансовым потерям из-за внепланового отключения. Внедрение устройств синхронизированных векторных измерений (СВИ) позволяет при эксплуатации силовых трансформаторов накапливать большое количество данных о различных режимах их работы и определять в этих режимах параметры схемы замещения. Использование *Simulink* позволяет создать модель для имитации широкого спектра повреждений трансформатора с учетом влияния его режимов работы, в том числе, обусловленных бросками тока намагничивания и внешними короткими замыканиями. Данная модель содержит электрическую часть трансформатора, источники синусоидального напряжения, которые имплементируют энергосистемы стороны высокого и низкого напряжений, и блок нагрузки на стороне низкого напряжения. Разработан подход по оценке параметров Т-образной схемы замещения двухобмоточного трансформатора в реальном времени на основе данных СВИ.

Ключевые слова: двухобмоточный трансформатор, моделирование, схема замещения, синхронизированные векторные измерения, сопротивление, цифровой двойник.

Для цитирования: Климова Т.Г., Смирнов В.С. Оценка параметров схемы замещения двухобмоточного трансформатора на базе синхронизированных векторных измерений // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 1. С. 102-119.
DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_102

ESTIMATION OF PARAMETERS OF TWO-WINDING TRANSFORMER EQUIVALENT CIRCUIT BASED ON PMU

T.G. Klimova

ORCID: 0000-0002-0219-7770 e-mail: tgklim@mail.ru
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Moscow, Russia

V.S. Smirnov

ORCID: 0000-0002-8655-405X e-mail: smirnovvs.21@gmail.com
NTC Mekhanotronika
Saint-Petersburg, Russia

Abstract. Power transformers of various designs are one of the most important and expensive elements of the power system. An unexpected failure of a power transformer can result in significant repair costs and financial losses due to an unplanned outage. The introduction of phasor measurement units (PMU) allows the operation of power transformers to accumulate a large amount of data on various modes of their operation and to determine the parameters of the equivalent circuit in these modes. The paper considers a model of a two-winding transformer, developed in the Simulink graphical simulation environment. The use of Simulink allows to create a model to simulate a wide range of transformer faults, considering the influence of its operating modes, including those caused by magnetizing current inrush and external short circuits. This model contains the electrical part of the transformer, sinusoidal voltage sources that implement the high and low electric power system sides respectively, and a load unit on the low voltage side. The main outcome of the research outlined in the article is the development of an approach to estimate the parameters of the T-shaped equivalent circuit of a two-winding transformer in real time based on PMU data.

Keywords: two-winding transformer, modeling, equivalent circuit, phasor measurement unit, resistance, digital twin.

For citation: T.G. Klimova and V.S. Smirnov, “Estimation of parameters of two-winding transformer equivalent circuit based on PMU”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 102-119, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_102

I. Введение

В настоящее время в электроэнергетике активно разрабатываются и применяются цифровые двойники, способные предоставлять особенности любых объектов или субъектов [1-3]. Цифровизацию (цифровое моделирование и управление) электроэнергетических систем (ЭЭС) и электротехнических комплексов целесообразно начинать с цифровизации отдельных энергетических объектов, т.е. с создания их цифровых двойников, функционирующих в реальном времени на основе данных телеизмерений базовых

параметров [4]. В крупных ЭЭС по всему миру массово внедряются устройства синхронизированных векторных измерений (УСВИ) напряжений и токов [5, 6]. Это создает предпосылки использования измерений УСВИ для оценки параметров схемы замещения силового оборудования [7], в том числе, параметров схемы замещения силового двухобмоточного трансформатора.

Дефекты элементов силовых трансформаторов вызывают отклонения их параметров (табл. 1), которые проявляются в значениях режимных параметров. Следовательно, по данным отклонениям можно обнаружить дефекты трансформаторов, а также связанные с ними изменения параметров схем замещения [8, 9], вплоть до предельно допустимых.

Таблица 1.
Базовая таблица допустимых отклонений

Table 1.
Common table of allowable deviations

№ п/п	Наименование параметра	Предельное отклонение, %	Примечание
1	Коэффициент трансформации	$\pm 1,0$	Для трансформаторов с коэффициентом трансформации фазных напряжений три и менее, а также на неосновном ответвлении
		$\pm 0,5$	Для всех остальных трансформаторов на основном ответвлении
2	Напряжение короткого замыкания (U_K) основного ответвления	$\pm 7,5$	Для двухобмоточного трансформатора или для пары обмоток трехобмоточного трансформатора, указанной в нормативной документации как основная пара, при $U_K > 10\%$
		± 10	Для остальных трансформаторов
3	Потери короткого замыкания на основном ответвлении	10	Для всех двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов и для основной пары обмоток трехобмоточных автотрансформаторов
		20	Для неосновных пар обмоток трехобмоточных автотрансформаторов
4	Потери холостого хода	15	Для всех трансформаторов
5	Суммарные потери	10	Для всех трансформаторов
6	Ток холостого хода	30	Для всех трансформаторов

Предельные отклонения измеряемых параметров трансформаторов от нормированных согласно ГОСТ Р 52719–2007 [10] не должны превышать значений, указанных в табл. 2.

Таблица 2.
Предельные допустимые отклонения параметров схем замещения трансформатора (по данным табл. 1)

Table 2.
Maximum allowable deviations of parameters of transformer equivalent circuit (according to Table 1)

№ п/п	Наименование параметра	Вычисляются по формулам	Предельное отклонение, %
1	Активное и индуктивное сопротивление продольной ветви	$x_T = \frac{U_{K\%} \cdot c}{100 \cdot S_{\text{ном}}}$	±7,5
		$r_T = \frac{\Delta P_K \cdot U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}}$	±10
			10
2	Активная и индуктивная проводимость ветви намагничивания	$g_T = \frac{\Delta P_X}{U_{\text{ном}}^2}$	20
		$b_T = \frac{I_{X\%} \cdot S_{\text{ном}}}{100 \cdot U_{\text{ном}}^2}$	15
			30

II. Математическая модель для оценки параметров схемы замещения

Исследование режима работы сложной электрической цепи часто сводится к установлению связи между токами, напряжениями и мощностями различных ее участков или ветвей. При этом режим остальной части цепи может оставаться неизвестным, хотя все ее параметры учитываются при решении задачи. В таких условиях рассматриваемая цепь может определяться обобщенными параметрами на соответствующих зажимах, относительно которых параметры заданы или должны быть найдены [11, 12].

T-образная схема замещения двухобмоточного трансформатора позволяет отдельно рассчитывать цепи первичной и вторичной обмоток. В схему замещения трансформатора входят поля рассеивания магнитного потока, а вторичные цепи пересчитываются в первичную через коэффициенты трансформации.

Рассмотрим одну фазу силового трансформатора через аппарат пассивного четырехполюсника (рис. 1) с известными параметрами по току и напряжению его выводов.

Систему уравнений для однофазного трансформатора, рассматриваемого как пассивный четырехполюсник, можно представить в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1^{(1)} & \underline{U}_1^{(2)} & \dots & \underline{U}_1^{(n)} \\ \underline{I}_1^{(1)} & \underline{I}_1^{(2)} & \dots & \underline{I}_1^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{a} & \underline{b} \\ \underline{c} & \underline{d} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \underline{U}_2^{(1)} & \underline{U}_2^{(2)} & \dots & \underline{U}_2^{(2)} \\ \underline{I}_2^{(1)} & \underline{I}_2^{(2)} & \dots & \underline{I}_2^{(2)} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\underline{U}_1, \underline{I}_1$ – синхронизированные векторные измерения (СВИ) (вектор основной гармоники в комплексной форме) со стороны высшего напряжения (ВН) трансформатора; $\underline{U}_2, \underline{I}_2$ – измерения СВИ (вектор основной гармоники в комплексной форме) со стороны низшего напряжения (НН) трансформатора; n – количество измерений СВИ, участвующих в расчете; $\underline{a}, \underline{b}, \underline{c}, \underline{d}$ – обобщенные параметры четырехполюсника в комплексной форме

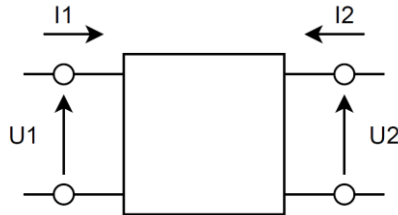


Рис. 1. Схема пассивного четырехполюсника

Fig. 1. Four-terminal passive network

Связь обобщенных параметров четырехполюсника с параметрами Т-образной схемы замещения трансформатора следующая:

$$\underline{Z}_{\text{вн}} = \frac{a-1}{c}; \quad (2)$$

$$\underline{Z}_{\text{нн}} = \frac{d-1}{c}; \quad (3)$$

$$\underline{Z}_m = \frac{1}{c}, \quad (4)$$

где $\underline{Z}_{\text{вн}}$ – полное сопротивление обмотки ВН в комплексной форме; $\underline{Z}_{\text{нн}}$ – полное сопротивление обмотки НН в комплексной форме; \underline{Z}_m – полное сопротивление магнитной цепи в комплексной форме.

Для решения рассматриваемой переопределенной задачи используется линейный метод наименьших квадратов (МНК) [13, 14]. Обозначим матрицу измерений СВИ со стороны ВН трансформатора через [И1], со стороны НН через [И2], а обобщенные параметры через [А]. Тогда решение системы по МНК примет вид:

$$[A] = [I1] * [I2]^T * ([I2] * [I2]^T)^{-1}. \quad (5)$$

Диаграмма последовательности действий разработанного подхода по оценке параметров схемы замещения силового трансформатора представлена на рис. 2.

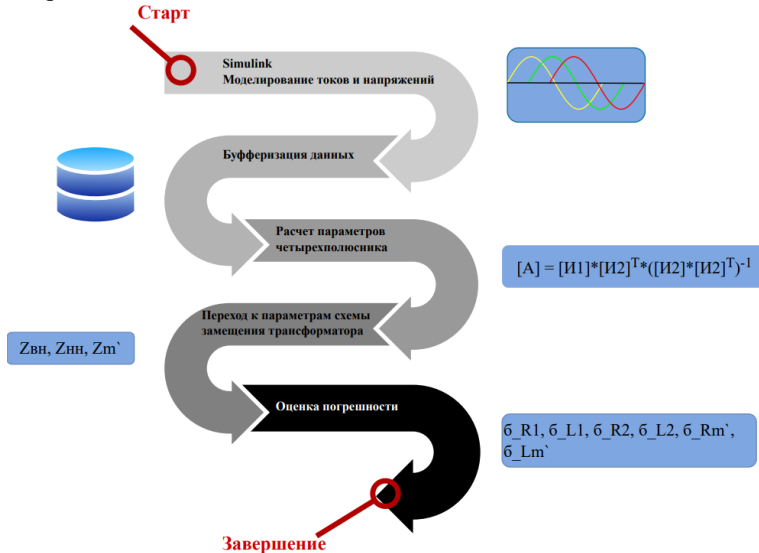


Рис. 2. Диаграмма подхода по оценке параметров схемы замещения

Fig. 2. Diagram of the approach for estimating the parameters of the equivalent circuit

Далее представлена идентификация параметров Т-образной схемы замещения трансформаторов, по предложенному алгоритму, и оценка погрешности идентификации.

III. Однофазный приведенный трансформатор

На начальном этапе апробации предложенного выше метода рассматривается Т-образная схема приведенного линейного трансформатора, смоделированная простейшими элементами электротехнической библиотеки *Simulink* [15]. Модель представлена на рис. 3. Параметры модели представлены в табл. 3.

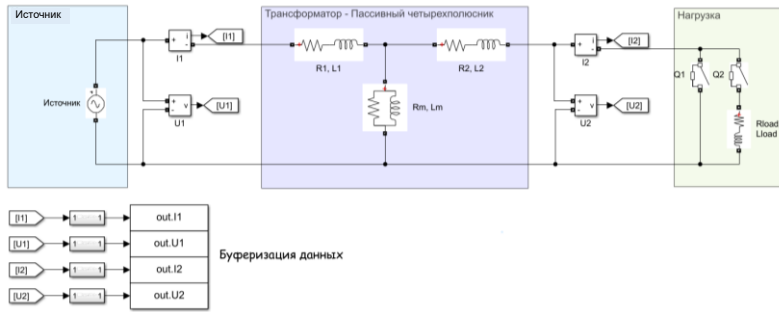


Рис. 3. Моделируемая схема в *Simulink* для Т-образной схемы замещения приведенного трансформатора

Fig. 3. Simulated circuit in *Simulink* for the T-shaped equivalent circuit of the reduced transformer

Таблица 3.
Исходные параметры схемы и трансформатора

Table 3.
Initial circuit and transformer parameters

Параметры сети	Значение
Амплитуда источника, В	100
Начальная фаза, °	0
$R_{\text{нагр}}$, Ом	изменяемая величина
$L_{\text{нагр}}$, Гн	изменяемая величина
Параметры схемы замещения трансформатора	Значение
R_1 , Ом	1
L_1 , Гн	0,001
R_2 , Ом	1
L_2 , Гн	0,001
R_m , Ом	9080,003316
L_m , Гн	2890,254822

Моделирование различных режимов работы осуществляется изменением значений активного сопротивления нагрузки, индуктивности нагрузки и включением/отключением выключателей $Q1$ и $Q2$. Рассматриваются режимы холостого хода, короткого замыкания и режимы нагрузки. Смоделированные данные буферизируются и обрабатываются алгоритмом, предложенным выше (5).

Смоделированные данные токов и напряжений стороны ВН и НН группируются в пяти различных наборах данных. В каждом наборе данных содержатся значения токов и напряжений различных режимов:

- 1) данные режимов холостого хода (XX), короткого замыкания (КЗ) и трех нагрузочных режимов;
- 2) данные режимов XX и КЗ;
- 3) данные режимов XX и трех нагрузочных режимов;
- 4) данные режимов КЗ и трех нагрузочных режимов;
- 5) данные трех нагрузочных режимов.

Каждый набор данных используется для идентификации параметров схемы замещения по (5). Рассмотрение пяти наборов данных необходимо для сравнения оцениваемых параметров схемы замещения и выбора, для дальнейшей работы, моделируемых режимов работы трансформатора.

В табл. 4 представлены результаты идентификации параметров Т-образной схемы замещения приведенного трансформатора для предложенных наборов данных. В табл. 5 представлены погрешности оценки параметров Т-образной схемы замещения приведенного трансформатора.

Таблица 4.
Оцененные параметры Т-образной схемы замещения для пяти наборов данных

Table 4.
Estimated parameters of the equivalent circuit for five data sets

Оцениваемый параметр	Набор данных 1	Набор данных 2	Набор данных 3	Набор данных 4	Набор данных 5
R_1 , Ом	0,9999975	1,0000000	1,0000000	1,0000078	0,9999898
L_1 , Гн	0,0010005	0,0010005	0,0010005	0,0010005	0,0010005
R_2 , Ом	1,0000083	1,0000078	1,0000105	1,0000050	1,0000073
L_2 , Гн	0,0010005	0,0010005	0,0010005	0,0010005	0,0010005
R_m , Ом	9080,85574 33	9080,86201 01	9080,86201 02	9080,83712 09	9080,84717 87
L_m , Гн	9,1960770	9,1961067	9,1961067	9,1960406	9,1960501

Результаты повторной идентификации параметров схемы замещения с измененными значениями R_1 и L_2 , представлены в табл. 6 и 7, а также на рис. 4. Значение активного сопротивления R_1 увеличено на 100 %, значение индуктивности L_2 увеличено на 200 %.

Представленные результаты относительной погрешности показывают высокую точность оценки параметров схемы замещения для всех пяти наборов данных. Максимальная погрешность оценки не превышает 0,06 %.

Таблица 5.
Относительная погрешность оценки параметров
Т-образной схемы замещения

Table 5.
Fractional error in estimating the parameters of the T-shaped equivalent circuit

Относительная погрешность	Набор данных 1	Набор данных 2	Набор данных 3	Набор данных 4	Набор данных 5
$\delta R_1, \%$	0,000250	0,000001	0,000001	0,000783	0,001017
$\delta L_1, \%$	0,050862	0,051436	0,051436	0,051568	0,050631
$\delta R_2, \%$	0,000832	0,000778	0,001053	0,000500	0,000727
$\delta L_2, \%$	0,053433	0,053478	0,054202	0,052751	0,053022
$\delta R_m, \%$	0,009388	0,009457	0,009457	0,009183	0,009294
$\delta L_m, \%$	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Таблица 6.
Оцененные параметры Т-образной схемы замещения
для пяти наборов данных с новыми R_1 и L_2

Table 6.
Estimated parameters of the equivalent
circuit for five data sets with new R_1 and L_2

Оцениваемый параметр	Набор данных 1	Набор данных 2	Набор данных 3	Набор данных 4	Набор данных 5
$R_1, \text{ Ом}$	2,000003	2,000000	2,000000	2,000008	2,000007
$L_1, \text{ Гн}$	0,001001	0,001001	0,001001	0,001001	0,001001
$R_2, \text{ Ом}$	1,000025	1,000020	1,000031	1,000012	1,000020
$L_2, \text{ Гн}$	0,003002	0,003002	0,003002	0,003002	0,003002
$R_m, \text{ Ом}$	9080,842831	9080,861938	9080,861938	9080,764278	9080,803517
$L_m, \text{ Гн}$	9,196029	9,196106	9,196106	9,195834	9,195937

Далее рассматривается наиболее приближенный к реальному трехфазный двухобмоточный трансформатор с учетом насыщения стали сердечника. При оценке параметров схемы замещения данного трансформатора анализируются только нагрузочные режимы работы. Это позволяет предположить, что в данных режимах работы параметры схемы замещения трансформатора не претерпевают резких скачкообразных изменений, что дает основание считать трансформатор линейным в рассматриваемых режимах и использовать предложенный ранее линейный МНК для оценки параметров схемы замещения трансформатора.

Таблица 7.

Относительная погрешность оценки параметров
Т-образной схемы замещения с новыми R_1 и L_2

Table 7.

Fractional error in estimating the parameters
of the T-shaped equivalent circuit with new R_1 and L_2

Относительная погрешность	Набор данных 1	Набор данных 2	Набор данных 3	Набор данных 4	Набор данных 5
$\bar{\delta} R_1, \%$	0,000128	0,000001	0,000001	0,000400	0,000366
$\bar{\delta} L_1, \%$	0,051590	0,051435	0,051435	0,051727	0,051293
$\bar{\delta} R_2, \%$	0,002530	0,001976	0,003053	0,001229	0,002007
$\bar{\delta} L_2, \%$	0,053644	0,053518	0,054515	0,051682	0,052808
$\bar{\delta} R_m', \%$	0,009246	0,009456	0,009456	0,008381	0,008813
$\bar{\delta} L_m', \%$	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

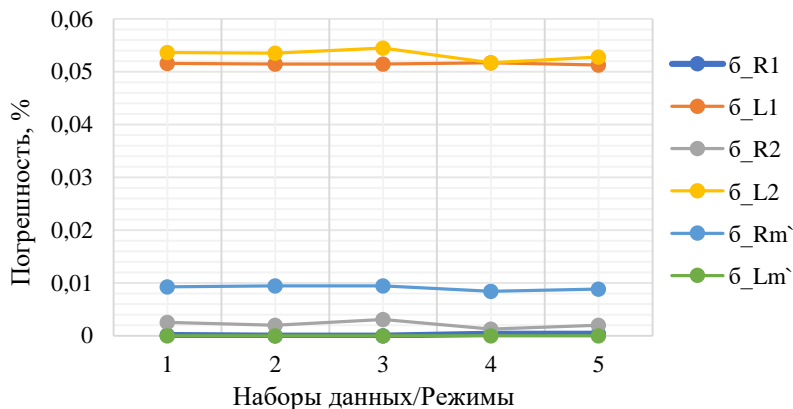


Рис. 4. Зависимость погрешности идентификации от наборов данных

Fig. 4. Dependence of identification error on the data sets

IV. Трехфазный двухобмоточный трансформатор

Электрическая схема для моделирования набора данных токов и напряжений трехфазного двухобмоточного трансформатора представлена на рис. 5. Схема содержит блок эквивалентной энергосистемы, блок трансформатора и блок нагрузки из электротехнической библиотеки *Simulink*. Паспортные данные трехфазного двухобмоточного трансформатора представлены в табл. 8. Рассчитанные параметры Т-образной схемы замещения по паспортным данным, представлены в табл. 9.

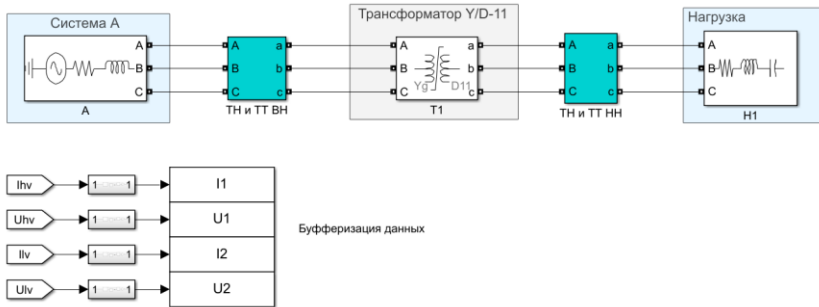


Рис. 5. Моделируемая схема в *Simulink* для трехфазного двухобмоточного трансформатора

Fig. 5. Simulated circuit in *Simulink* for three-phase two-winding transformer

Таблица 8.
Паспортные данные трехфазного двухобмоточного трансформатора

Table 8.
Datasheet for three-phase two-winding transformer

Параметр	Значение
Мощность, МВА	63
Высшее напряжение, кВ	121
Низшее напряжение, кВ	10,5
U_k , %	10,5
P_k , кВт	245
$P_{хх}$, кВт	59
$I_{хх}$, %	0,65

Моделирование различных режимов работы осуществляется изменением значения потребляемой мощности блока нагрузки. Для идентификации параметров Т-образной схемы замещения, рассматриваемого трансформатора, было накоплено более 100 000 выборок токов и напряжений нагрузочного режима, что соответствует примерно 33-м мин наблюдения.

В табл. 10 представлены результаты идентификации параметров Т-образной схемы замещения трехфазного двухобмоточного трансформатора. В табл. 11 представлены погрешности оценки параметров Т-образной схемы замещения, рассматриваемого трансформатора. Рис. 6 иллюстрирует полученные погрешности идентификации параметров схемы замещения для каждой из фаз.

Таблица 9.
Рассчитанные параметры Т-образной схемы замещения
по паспортным данным трансформатора

Table 9.
Calculated parameters of the T-shaped equivalent circuit
according to the transformer datasheet

Оцениваемый параметр	фаза А	фаза В	фаза С
R_1 , Ом	0,150628	0,150628	0,150628
L_1 , Гн	0,012937	0,012937	0,012937
R_2 , Ом	0,003403	0,003403	0,003403
L_2 , Гн	0,000292	0,000292	0,000292
R_m^{\wedge} , Ом	1717,092477	1717,092477	1717,092477
L_m^{\wedge} , Гн	37,539684	37,539684	37,539684

Таблица 10
Оцененные параметры Т-образной схемы замещения

Table 10.
Estimated parameters of the T-shaped equivalent circuit

Оцениваемый параметр	фаза А	фаза В	фаза С
R_1 , Ом	0,150626	0,150628	0,150627
L_1 , Гн	0,012943	0,012943	0,012943
R_2 , Ом	0,150635	0,150630	0,150629
L_2 , Гн	0,012943	0,012943	0,012943
R_m^{\wedge} , Ом	1718,819287	1718,822098	1718,821476
L_m^{\wedge} , Гн	37,558193	37,558196	37,558186

Таблица 11.
Относительная погрешность оценки параметров
Т-образной схемы замещения

Table 11.
Fractional error in estimating the parameters
of the T-shaped equivalent circuit

Относительная погрешность	фаза А	фаза В	фаза С
δR_1 , %	0,001190	0,000474	0,000465
δL_1 , %	0,051456	0,051448	0,051406
δR_2 , %	0,004948	0,001695	0,001255
δL_2 , %	0,051450	0,051362	0,051510
δR_m^{\wedge} , %	0,100566	0,100730	0,100693
δL_m^{\wedge} , %	0,000000	0,000000	0,000000

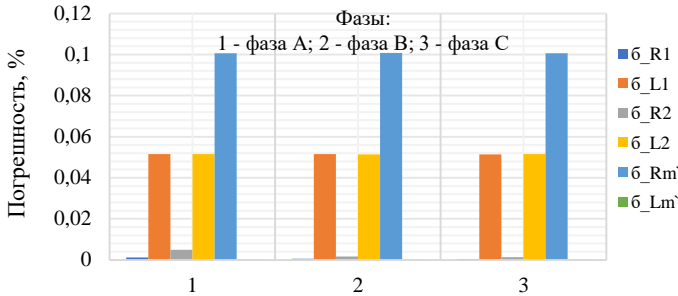


Рис. 6. Погрешности идентификации параметров схемы замещения для каждой из фаз трансформатора

Fig. 6. Errors of identification of parameters of the equivalent circuit for each of the transformer phases

Представленные результаты относительной погрешности показывают высокую точность оценки параметров схемы замещения. Максимальная погрешность оценки не превышает 0,11 %. При необходимости перехода к параметрам Стандарта [10] целесообразно воспользоваться табл. 12.

**Таблица 12.
Нахождение паспортных данных по параметрам схем замещения трансформатора**

**Table 12.
Finding nameplate data on the parameters of transformer equivalent circuit**

№ п/п	Наименование рассчитываемого параметра	Измеренный параметр	Паспортный параметр
1	Напряжение короткого замыкания % $U_{\text{ном}}$ $U_{\text{к\%}}$	Индуктивное сопротивление продольной ветви x_{T}	$U_{\text{к\%}} = x_{\text{T}} \cdot 100 \cdot \frac{S_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}^2}$
	Потери короткого замыкания, $\Delta P_{\text{к}}$	Активное сопротивление продольной ветви r_{T}	$\Delta P_{\text{к}} = r_{\text{T}} \cdot \frac{S_{\text{ном}}^2}{U_{\text{ном}}^2}$
2	Потери холостого хода ΔP_{x}	Активная проводимость ветви намагничивания g_{T}	$\Delta P_{\text{x}} = g_{\text{T}} \cdot U_{\text{ном}}^2$
	Ток холостого хода % $I_{\text{ном}}$ $I_{\text{x\%}}$	Индуктивная проводимость ветви намагничивания b_{T}	$I_{\text{x\%}} = \frac{b_{\text{T}} \cdot 100 \cdot U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}}$

В. Выводы

Основной результат работы – аналитический подход по оценке параметров Т-образной схемы замещения двухобмоточного трансформатора на основе данных СВИ, с использованием линейного метода наименьших квадратов [13]. Даже без учета погрешности, вносимой самими УСВИ (суммарный квадрат погрешности не превысит суммы квадратов погрешностей устройств, данные с которых задействованы в расчете), точность оценки и простота реализации являются основными преимуществами данного подхода. Метод позволяет также оценивать параметры трансформатора отдельно для стороны ВН, стороны НН и магнитной цепи соответственно.

Использование УСВИ обеспечивает получение оценок параметров схемы замещения в реальном времени без отключения силового трансформатора. Синхронизация измерений режимных параметров в разных точках объекта и их высокая точность позволяет определить любые изменения параметров схемы замещения трансформатора, характеризующие его состояние. Это является исходными данными для создания цифровых двойников силовых трансформаторов по описанной математической модели.

© Климова Т.Г., 2023

© Смирнов В.С., 2023

Поступила в редакцию 27.10.2022

Received 27.10.2022

Библиографический список

- [1] Yang Y., Chen Z., Yan J., Xiong Z., Zhang J., Yuan H., Tu Y., Zhang T. State evaluation of power transformer based on digital twin // *proc. 2019 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI)*, Nov. 6-8, 2019, Zhengzhou, China: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/SOLI48380.2019.8955043
- [2] Moutis P., Alizadeh-Mousavi O. Digital twin of distribution power transformer for real-time monitoring of medium voltage from low voltage measurement // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020. Vol. 36. No. 4. P. 1952-1963. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3017355
- [3] Воропай Н.И., Массель Л.В., Колосок И.Н., Массель А.Г. ИТ-инфраструктура для построения интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики на основе цифровых двойников и цифровых образов // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2021. № 1. С. 3-13. DOI: 10.31857/S0002331021010180
- [4] Бутырин П.А., Алпатов М.Е. Цифровизация и аналитика в электротехнике. Цифровые двойники трансформаторов // *Электричество*. 2021. № 10. С. 4-10. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-10-4-10
- [5] Chakrabarti S., Kyriakides E., Bi T., Cai D., Terzija V. Measurements get together // *IEEE Power and Energy Magazine*. 2009. Vol. 7. No. 1. P. 41-49. DOI: 10.1109/MPE.2008.930657

- [6] Жуков А.В., Сацук Е.И., Дубинин Д.М., Опалев О.Л., Уткин Д.Н. Опыт разработки, внедрения и эксплуатации системы мониторинга переходных режимов в ЕЭС России // 5-я Международ. науч.-тех. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем», Июнь 1-5, 2015. № 4 (31). С. 124-127.
- [7] Иванов И.Е., Жуков А.В., Дубинин Д.М. Идентификация параметров линий электропередачи различной конфигурации на базе данных СВИ // Релейщик. 2021. № 2 (40). С. 20-25.
- [8] Лизунов С.Д., Лоханин А.К. Силовые трансформаторы. Справочная книга. М.: Энергоиздат, 2004. – 614 с.
- [9] Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
- [10] ГОСТ Р 52719-2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. Введ. 2008-01-01. М.: Стандартинформ, 2007. – 46 с.
- [11] Бутырин П.А., Толчеев О.В., Шакирзянов Ф.Н. Основы электротехники. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – 360 с.
- [12] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Юрайт, 2014. – 701 с.
- [13] Ильин В.А., Позняк Э.Г. Линейная алгебра. М.: Физмалит, 2005. – 280 с.
- [14] Кривилев А.В. Основы компьютерной математики с использованием MATLAB. М.: Лекс-Книга, 2005. – 483 с.
- [15] Mathworks [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/> (дата обращения 10.02.2022).

References

- [1] Y. Yang, Z. Chen, J. Yan, Z. Xiong, J. Zhang, H. Yuan, Y. Tu and T. Zhang, “State evaluation of power transformer based on digital twin”, in proc. *2019 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI), and Informatics (SOLI)*, Nov. 6-8, 2019, Zhengzhou, China. DOI: 10.1109/SOLI48380.2019.8955043
- [2] P. Moutis and O. Alizadeh-Mousavi, “Digital twin of distribution power transformer for real-time monitoring of medium voltage from low voltage measurement”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 4, pp. 1952-1963, 2020. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3017355
- [3] N.I. Voropai, L.V. Massel, I.N. Kolosok and A.G. Massel, “IT-infrastructure for construction of intelligent management systems of development and functioning of energy systems based on digital twins and digital images”, *Izvestiya Rossijskoi Akademii Nauk. Energy*, no. 1, pp. 3-13, 2021. DOI: 10.31857/S0002331021010180
- [4] P.A. Butyrin and M.E. Alpatov, “Digitalization and analytics in electrical engineering. digital twins of transformers”, *Electricity*, no. 10, pp. 4-10, 2021.
- [5] S. Chakrabarti, E. Kyriakides, T. Bi, D. Cai and V. Terzija, “Measurements get together”, *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 7, no. 1, pp. 41-49, 2009. DOI: 10.1109/MPE.2008.930657
- [6] A.V. Zhukov, E.I. Sacuk, D.M. Dubinin, O.L. Opalev, D.N. Utkin, “Opyt razrabotki, vnedreniya i ekspluatatsii sistemy monitoringa perekhodnyh rezhimov v EES Rossii

- [Experience in the development, implementation and operation of a system for monitoring transient regimes in the UES of Russia]”, in proc. 5-ya *Mezhdunarod. nauch.-tekh. konf. “Sovremennye napravleniya razvitiya sistem relejnoj zashchity i avtomatiki energosistem” [5th International. sci.-tech. conf. “Modern trends in the development of relay protection systems and automation of power systems”]*, Jun. 1-5, 2015, vol. 4, no. 31, pp. 124-127 (in Russian).
- [7] I.E. Ivanov, A.V. Zhukov and D.M. Dubinin, “Identifikaciya parametrov linij elektropredachi razlichnoj konfiguracii na baze dannyh SVI [Identification of the parameters of power lines of various configurations based on the data of SMI], *Relejshchik [Relayshchik]*, vol. 2, no. 40, pp. 20-25, 2021 (in Russian).
- [8] S.D. Lizunov and A.K. Lohanin, *Silovye transformatory. Spravochnaya kniga [Power transformers. Reference book]*. Moscow: Energoizdat, 2004 (in Russian).
- [9] B.N. Neklepaev, *Elektricheskaya chast' elektrostancij i podstancij: Spravochnye materialy dlya kursovogo i diplomnogo proektirovaniya [Electrical part of power plants and substations: Reference materials for course and diploma design]*. Moscow: Energoatomizdat, 1989 (in Russian).
- [10] Power transformers. General specifications, GOST R 52719-2007, Jan. 2008.
- [11] P.A. Butyrin, O.V. Tolcheev and F.N. Shakirzyanov, *Osnovy elektrotehniki [Fundamentals of electrical engineering]*. Moscow: MPEI Publishing House, 2014 (in Russian).
- [12] L.A. Bessonov, *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie cepi [Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuits]*. Moscow: Yurayt, 2014 (in Russian).
- [13] V.A. Ilin and E.G. Poznyak, *Linejnaya algebra [Linear algebra]*. Moscow: Fismalit, 2005 (in Russian).
- [14] A.V. Krivilev, *Osnovy komp'yuternoj matematiki s ispol'zovaniem MATLAB [Fundamentals of computer Mathematics using MATLAB]*. Moscow: Lex-Book, 2005 (in Russian).
- [15] Mathworks [Online]. Available at: <https://www.mathworks.com/> [Accessed: Feb. 10, 2022].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Климова Татьяна Георгиевна, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

Смирнов Владимир Сергеевич, ведущий инженер НТЦ Механотроника, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Tatyana G. Klimova, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation.

Vladimir S. Smirnov, leading engineer of the NTC Mekhanotronika, Saint-Petersburg, Russian Federation.

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ГЕНЕРИРУЮЩЕЙ МОЩНОСТИ И ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ СОБОЛЕВСКОГО ИЗОЛИРОВАННОГО ЭНЕРГОУЗЛА КАМЧАТСКОГО КРАЯ

О.А. Белов

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

Камчатский государственный технический университет

Петропавловск-Камчатский, Россия

В статье рассмотрены структура установленной электрической мощности и состав генерирующего оборудования электростанций, проведен анализ и определены основные показатели динамики потребления электроэнергии и мощности в Соболевском изолированном энергоузле (Камчатский край). Выполнен анализ существующего баланса мощности и электрической энергии, определены основные технико-экономические параметры электроснабжения. Рассмотрены варианты развития системы электроснабжения Соболевского энергоузла, в том числе, на основе возобновляемых источников энергии. Также рассмотрены вопросы развития сетевой инфраструктуры и генерирующих мощностей, обеспечения долгосрочного и среднесрочного спроса на электрическую энергию и мощность. На основе анализа энергетической структуры Соболевского энергоузла и динамики электропотребления рассчитаны действующий и перспективный балансы электроэнергии и мощности в данном энергоузле. При решении задач исследования применялись методы математической обработки статистических данных и методы нормативного прогнозирования. Представленная комплексная оценка состояния электроэнергетики в изолированном Соболевском энергоузле позволяет спрогнозировать перспективы ее развития в рамках общего развития электроэнергетического комплекса Камчатского края.

Ключевые слова: генерирующие мощности, гидроэнергетика, система электроснабжения, электрический баланс, электроэнергия, энерготариф, энергоузел.

Для цитирования: Белов О.А. Анализ структуры генерирующей мощности и динамики электропотребления Соболевского изолированного энергоузла Камчатского края // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 1. С. 118-138.

DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_118

STRUCTURE ANALYSIS OF GENERATING POWER AND ELECTRICAL CONSUMPTION DYNAMICS OF SOBOLEVSKY ISOLATED POWER HUB OF KAMCHATKA TERRITORY

O.A. Belov

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

Kamchatka State Technical University
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract. Improving the reliability and efficiency of power supply to remote energy-isolated territories is an urgent task, since any failure in an isolated system leads to dangerous crisis events and significant economic losses. The Sobolevsky district of the Kamchatka Territory belongs to such energetically decentralized territories. In this regard, it becomes necessary to analyze the composition and characteristics of the power grid of the Sobolevsky isolated power generation unit. When solving research problems, methods of mathematical processing of statistical data and methods of normative forecasting were used. The article considers the structure of installed electric capacity and the composition of generating equipment of power plants, analyzes and defines the basic indicators of the dynamics of electricity consumption and capacity in the Sobolevsky isolated power generation center. An analysis of the existing balance of power and electric energy was carried out, the main technical and economic parameters of the power supply of the Sobolevsky isolated power generation unit are determined. Options for the development of the power supply system of the Sobolevsky power generation unit, including those based on renewable energy sources, are considered. The issues related to the development of network infrastructure and generating capacities, ensuring long-term and medium-term demand for electric energy and capacity are also considered. Based on the analysis of the energy structure of the Sobolevsky power plant and the dynamics of power consumption, the current and prospective balances of electricity and power in this power plant are calculated. The presented comprehensive assessment of the state of electric power generation in the isolated Sobolevsky power generation center makes it possible to predict the performance of its development within the framework of the general development of the electric power complex of the Kamchatka Territory.

Keywords: generating capacities, hydropower, power supply system, electric balance, electric power, energy tariff, power unit.

For citation: O.A. Belov, “Structure analysis of generating power and electrical consumption dynamics of Sobolevsky isolated power hub of Kamchatka territory”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 118-138, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_118

I. Введение

На территории Российской Федерации существует большое количество изолированных энергоузлов, не подключенных к Единой национальной электрической сети (ЕНЭС). Введение их в структуру ЕНЭС является

технически нерациональным и экономически необоснованным из-за удаленности таких объектов и низкого уровня развития их энергетической инфраструктуры. Одним из таких энергопроблемных регионов является Камчатский край на восточной границе России, территориально входящий в состав Дальневосточного федерального округа (ДФО). Население региона составляет 313 тыс. чел. Около 78 % населения Камчатского края проживает в городах, 22 % – в сельской местности. В состав края включены 14 муниципальных образований, в том числе 3 городских округа, 1 муниципальный округ и 10 муниципальных районов, в состав которых включены городские и сельские поселения.

Энергосистема Камчатского края работает изолированно, и в ее состав входят Центральный энергоузел и 13 изолированно работающих энергоузлов. Основными компаниями, осуществляющими энергоснабжение изолированных энергоузлов Камчатского края, являются АО «Южные электрические сети Камчатки» (АО «ЮЭСК»), АО «Корякэнерго» и ПАО «Камчатскэнерго» [1, 2].

Повышение надежности, безопасности и эффективности системы электроснабжения изолированных энергоузлов Камчатского края, а также снижение уровня экономически обоснованного тарифа на электроэнергию является важной и актуальной задачей. Экономически обоснованный тариф на электроэнергию на 01.01.2022 по АО «Корякэнерго» составил 42,39 руб./кВтч, а по АО «ЮЭСК» достиг 52,97 руб./кВтч.

Соболевский изолированный энергоузел представляет особый интерес, так как на его территории идет добыча природного газа, что позволяет существенно оптимизировать производство электроэнергии на данной территории. В связи с этим, требуется проведение комплексного анализа системы генерации и динамики электропотребления в данном энергоузле.

Соболевский изолированный энергоузел расположен в западной части полуострова Камчатка и обеспечивает электроснабжение потребителей Соболевского муниципального района. Территориальные границы Соболевского изолированного энергоузла представлены на рис. 1. Административный центр Соболевского муниципального района – с. Соболево с населением 1698 чел. Перечень и краткая характеристика населенных пунктов Соболевского муниципального района Камчатского края, входящих в состав Соболевского изолированного энергоузла, представлен в табл. 1.

Актуальность задачи оптимизации системы генерации в зонах децентрализованного электроснабжения подтверждается большим количеством исследований по данной теме. В работах Антонова Н.В. [3], Безруких П.П. [4, 5], Тягунова М.Г. [6, 7] рассмотрены возможность и перспективы использования нетрадиционных возобновляемых источников электроэнергии.

Необходимость развития региональной гидроэнергетики обоснована в публикациях Семчева В.А. [8, 9]. Вопросам повышения надежности и эффективности отдельных элементов системы электроснабжения посвящены научные исследования Лукутина Б.В. [10], Воскобоева В.Ф. [11] и др. В публикациях большинства авторов подчеркивается, что для оптимизации системы электроснабжения конкретного изолированного энергоузла необходимо найти оптимальный баланс между генерацией и потреблением электрической энергии. Вместе с тем, неоднородность структуры генерации и потребления электрической энергии в зонах децентрализованного электроснабжения не позволяет использовать какой-либо универсальный подход в решении задач оптимизации. Требуется учитывать множество дополнительных факторов, связанных с конкретным изолированным энергоузлом.



**Рис. 1. Схема территориального расположения
Соболевского изолированного энергоузла**

Fig. 1. The scheme of the territorial location of Sobolevsky isolated power hub

В связи с этим, исследование структуры генерации Соболевского изолированного энергоузла в совокупности с анализом существующего электропотребления, а также разработка прогноза электропотребления на перспективу, имеют высокую научную и практическую значимость.

Таблица 1.
Общий состав Соболевского изолированного энергоузла

Table 1.
The general composition of the Sobolevsky isolated power hub

Поселение	Населенный пункт	Энергоисточник	Население, чел.	Расстояние до централизованных сетей, км
Соболевское сельское поселение	с. Соболево	ГДЭС-7, Локальные системы электроснабжения	1698	215
Крутогоровское сельское поселение	п. Крутогоровский	ГДЭС-21, котельная	358	299
Межселенная территория	п. Ичинский	ДЭС-22	27	343

II. Материалы и методы

Анализ функционирования системы электроснабжения Соболевского изолированного энергоузла проводился на основе математической обработки статистических данных с использованием методов нормативного прогнозирования. Рассматривалась общая структура системы генерации в энергоузле и анализировалась динамика потребления электроэнергии и мощности за прошедший пятилетний период.

В зону влияния Соболевского энергоузла входят села Соболево и Устьевое, поселки Крутогоровский и Ичинский. Питание энергоузла осуществляется децентрализованно от газодизельных электростанций (ГДЭС) и дизельной электростанции (ДЭС). ГДЭС-7 обеспечивает электроснабжение сел Соболево и Устьевое по ВЛ 35 кВ Соболево – Устьевое.

Электрические сети 35 кВ развиты в 9 из 13 изолированных энергоузлах Камчатского края, в том числе, в Соболевском энергоузле. Основные характеристики электросетевого хозяйства 35 кВ Соболевского изолированного энергоузла представлены в табл. 2.

Анализ технического состояния электросетевых объектов напряжением 35 кВ показал, что воздушные линии и трансформаторы 35 кВ со сверхнормативным сроком эксплуатации отсутствуют [10, 11]. По данным АО «ЮЭСК», необходима реконструкция ВЛ 35 кВ с заменой провода на самонесущий изолированный провод в связи с большими ветровыми нагрузками и прохождением ВЛ вблизи Охотского моря.

Таблица 2.
Характеристика воздушных линий и подстанций 35 кВ

Table 2.
Characteristics of overhead lines and substations 35 kV

Наименование объекта	Год ввода	Длина ВЛ 35 кВ, км	Мощность ПС 35 кВ, шт. х МВА
ВЛ 35 кВ Соболево-Устьевое	1999	17,3	–
ПС 35 кВ Соболево	1999	–	1х1 1х1,6
ПС 35 кВ Устьевое	1999	–	2х1
Всего		17,3	4х4,6

Поселки Крутогоровский и Ичинский расположены севернее с. Соболево на побережье Охотского моря. Расстояние от с. Соболево до п. Крутогоровский составляет более 100 км, а до п. Ичинский – более 200 км. Электроснабжение потребителей в поселках Крутогоровский и Ичинский осуществляется децентрализованно от электростанций ГДЭС-21 и ДЭС-22 соответственно. Данные за 2021 г. по установленной мощности и годовой выработки электростанций Соболевского изолированного энергоузла по типам генерирующего оборудования представлены в табл. 3.

Таблица 3.
Установленные мощности (на 01.01.2022 г.) и годовые выработки (за 2021 г.) электростанций Соболевского изолированного энергоузла

Table 3.
Installed capacities (as of 01.01.2022) and annual outputs (for 2021) of power plants of the Sobolevsky isolated power hub

Населенный пункт	Наименование ген. источника	Установленная мощность, МВт	Доля, %	Годовая выработка, млн. кВт·ч	Доля, %
Суммарно по изолированным энергоузлам Камчатского края		106,79	100,0	220,647	100,0
с. Соболево	ГДЭС-7	4,67	4,4	12,839	5,8
п. Крутогоровский	ГДЭС-21	2,34	2,2	7,817	3,5
п. Ичинский	ДЭС-22	0,24	0,2	1,571	0,8
Суммарно по узлу		7,25	6,8	22,227	10,1

Основу генерации в Соболевском энергоузле составляет ГДЭС-7, на долю которой приходится более 60 % установленной мощности и годовой выработки электроэнергии. Вторая по величине генерация в Соболевском изолированном энергоузле ГДЭС-21 составляет 2,34 МВт установленной мощности и производит около 30 % электроэнергии. На долю ДЭС-22 приходится менее 10 % годовой выработки при установленной мощности 0,24 МВт. Таким образом, Соболевский изолированный энергоузел включает в себя три децентрализованные системы электроснабжения со значительным перепадом по установленной мощности и годовой выработке электроэнергии. При этом следует отметить, что основная генерирующая мощность в энергоузле формируется на основе ГДЭС, соответственно и параметры экономически обоснованного тарифа на электроэнергию в Соболевском энергоузле определяются себестоимостью производства электрической энергии на данных электростанциях.

Основное электрооборудование электростанций в Соболевском изолированном энергоузле существенно различается как по типовому составу, так и по фактическому сроку службы. Состав основного генерирующего оборудования электростанций Соболевского изолированного энергоузла приведен в табл. 4.

Анализ технического состояния генерирующего оборудования показывает, что из 7,25 МВт установленной мощности более 30 % составляет оборудование с фактическим сроком службы до 10 лет. Электрооборудование с фактическим сроком службы более 30 лет составляет около 9 %. Таким образом, в Соболевском энергоузле обеспечивается как необходимый уровень надежности электроснабжения, так и нормативные показатели расхода топлива относительно установленных общепромышленных показателей [12, 13].

Оценка эксплуатационной эффективности электроснабжения показала, что процент потребления электроэнергии на собственные нужды электростанций и технологические потери электроэнергии в сетях Соболевского изолированного энергоузла находятся в допустимых пределах.

Анализ динамики потребления электроэнергии и мощности проводился на основе статистических данных, приведенных в открытых источниках. Суммарные показатели электропотребления и средние показатели максимального потребления мощности в Соболевском энергоузле за пятилетний период представлены в табл. 5. За рассматриваемый пятилетний период (2017-2021 гг.) в Соболевском энергоузле наблюдается определенный рост электропотребления, величина которого на 01.01.2022 составила 20,68 млн кВт·ч, что на 22,5 % выше аналогичного показателя 2017 г.

Динамика роста в течение пятилетнего периода была неравномерной. В 2018 г. электропотребление Соболевского энергоузла увеличилось на 3,93

млн кВт·ч (+19,67 %), а в 2019 г. наблюдалось снижение величины электропотребления на 1,47 млн кВт·ч (–7,36 %) относительно 2018 г., в 2020 г. электропотребление увеличилось до величины 20,42 млн кВт·ч. В 2021 г. электропотребление Соболевского энергоузла вновь возросло, рост составил 0,26 млн кВт·ч (+1,26 %) относительно 2020 г.

Таблица 4.
Состав генерирующего оборудования электростанций
Соболевского изолированного энергоузла

Table 4.
The composition of the generating equipment of power plants
of the Sobolevsky isolated power hub

Электростанция	Место расположения	Номер агрегатора	Тип оборудования	Год ввода	Вид топлива	Установленная мощность на 01.01.2022 г., МВт	Фактический срок службы, лет
ГДЭС-7	с. Соболево, Соболевский район, Камчатский край	M1	Caterpillar 3516	2009	природный газ	4,67	13
		M2	Caterpillar 3516	2009	природный газ		13
		3	Caterpillar 3512	2013	д/т		9
		6	4-26ДГ	1988	д/т		34
ГДЭС-21	п. Крутого-ровский, Соболевский район, Камчатский край	1	DA-MW750NG	2021	природный газ	2,34	4
		2	DA-MW750NG	2021	природный газ		8
		3	RK550GF	2011	д/т		11
		4	RK700GF	2012	д/т		32
ДЭС-22	п. Ичинский, Соболевский район, Камчатский край	1	S110HC	2018	д/т	0,24	4
		2	DA-C100	2020	д/т		2
		3	S110HC	2018	д/т		4

В 2021 г. максимальное потребление мощности Соболевского энергоузла было зафиксировано на уровне 2,70 МВт, что на 0,47 МВт превышает

аналогичный показатель максимального потребления мощности в 2017 г. Динамика потребления электрической энергии и мощности в Соболевском энергоузле за пятилетний период наглядно представлена на диаграмме (рис. 2).

Таблица 5.
Показатели электропотребления
в Соболевском изолированном энергоузле за пятилетний период

Table 5.
Power consumption indicators
in Sobolevsky isolated power hub for five-year period

Наименование	2017	2018	2019	2020	2021
Электропотребление, млн кВт·ч	16,05	19,98	18,51	20,42	20,68
Абсолютный прирост электропотребления, млн кВт·ч	-1,82	3,93	-1,47	1,91	0,26
Годовой прирост электропотребления, %	-10,17	24,46	-7,35	10,33	1,27
Максимальное потребление мощности, МВт	2,23	2,61	2,75	2,74	2,70
Абсолютный прирост максимального потребления мощности, МВт	-0,01	0,38	0,14	-0,01	-0,04
Годовой прирост максимального потребления мощности, %	-0,41	17,23	5,21	-0,34	-1,46

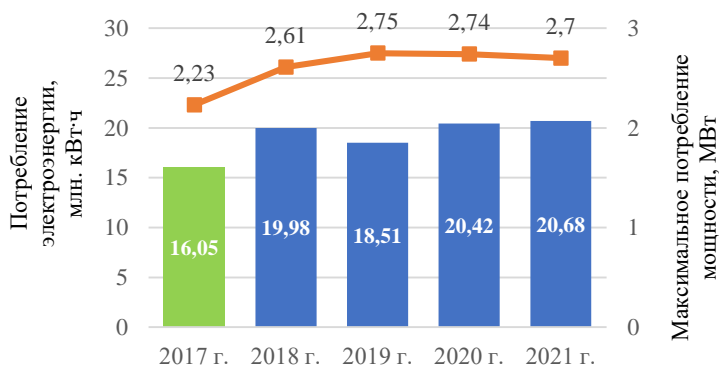


Рис. 2. Динамика потребления электрической энергии и мощности Соболевского изолированного энергоузла

Fig. 2. Dynamics of electricity and power consumption of Sobolevsky isolated power hub

Основной причиной роста динамики электропотребления в Соболевском изолированном энергоузле является снижение экономически обоснованного тарифа на электроснабжение в связи с переводом системы генерации на природный газ. Электроснабжение в энергоузле осуществляется в основном за счет ГДЭС, использующих для работы в основном природный газ и частично дизельное топливо. При этом высокая стоимость обслуживания электроэнергетических объектов обусловлена такими факторами, как сложные климатические условия (циклоны, ветровые нагрузки, гололедообразование), географическая удаленность населенных пунктов, отсутствие развитой транспортной инфраструктуры [6, 14].

Анализ баланса мощности и электрической энергии показал, что генерирующие источники Соболевского изолированного энергоузла полностью обеспечивали потребность в мощности и электроэнергии в 2021 г. Фактический баланс мощности и электрической энергии Соболевского изолированного энергоузла за 2021 г. представлен ниже в табл. 6.

Таблица 6.
Фактический баланс мощности и электрической энергии за 2021 г.

Table 6.
Actual balance of power and electric energy for 2021

Населенный пункт	Наименование ген. источника	Максимум потребления мощности, МВт	Установленная мощность, МВт	Дефицит (-) / Избыток (+), МВт	Годовая выработка, млн кВт·ч	ЧЧИ собственного максимального максимума нагрузки
с. Соболево	ГДЭС-7	2,25	4,67	2,42	12,84	1920
п. Крутогоровский	ГДЭС-21	0,42	2,34	1,92	7,82	1510
п. Ичинский	ДЭС-22	0,04	0,24	0,20	1,57	1480
Суммарно по Соболевскому энергоузлу		2,71	7,25	4,54	22,23	4910

В исследуемый период баланс мощности Соболевского изолированного энергоузла складывался избыточно по установленной мощности. При этом величина фактического резерва установленной мощности источников генерации по электростанциям находилась в диапазоне от 52 до 83,3 %. В целом по Соболевскому изолированному энергоузлу величина фактического резерва установленной мощности источников генерации составила более 62 %. Частично резерв установленной мощности использовался для

сезонного электроснабжения рыбоперерабатывающих предприятий, функционирующих на территории Соболевского района.

III. Результаты и обсуждение

На основании проведенного анализа динамики потребления электроэнергии и мощности за прошедший пятилетний период в Соболевском изолированном энергоузле разработан прогноз потребления электроэнергии и мощности. Прогноз потребления электрической энергии и мощности в Соболевском изолированном энергоузле на пятилетний период сформирован с учетом прогноза полезного отпуска электроэнергии потребителям населенных пунктов в соответствии с информацией, предоставленной АО «ЮЭСК», АО «Корякэнерго», ПАО «Камчатскэнерго», а также с учетом изменения потребления электрической энергии и мощности в соответствии с утвержденными техническими условиями на технологическое присоединение. Прогноз динамики электропотребления в Соболевском энергоузле на перспективу 2022-2026 гг. представлен в табл. 7.

Таблица 7.

Прогноз электропотребления и максимального потребления мощности Соболевского энергоузла на перспективу 2022-2026 гг.

Table 7.

Forecast of power consumption and maximum power consumption of Sobolevsky power hub for the future 2022-2026

Наименование	2021 (отчет)	2022	2023	2024	2025	2026
Электропотребление, млн кВт·ч	20,42	20,51	21,77	21,77	21,77	21,77
Абсолютный прирост электропотребления, млн кВт·ч	0,00	0,09	1,26	0,00	0,00	0,00
Годовой прирост электропотребления, %	0,00	0,44	6,14	0,00	0,00	0,00
Максимальное потребление мощности, МВт	2,71	2,82	2,95	3,07	3,21	3,36
Абсолютный прирост максимального потребления мощности, МВт	-0,03	0,11	0,13	0,12	0,14	0,15
Годовой прирост максимального потребления мощности, %	-1,09	4,06	4,61	4,07	4,56	4,67

В рассматриваемой перспективе значительного роста нагрузки в Соболевском изолированном энергоузле не ожидается. Прогнозируемая динамика основывается, в основном, на развитии в данном районе рыбопромышленных объектов и объектов хозяйственной деятельности. Возможно также

увеличение электропотребления в случае более интенсивного развития туристического сектора. Прогнозируемая динамика потребления электрической энергии и мощности в Соболевском изолированном энергоузле на пятилетнюю перспективу представлена в виде диаграммы на рис. 3.

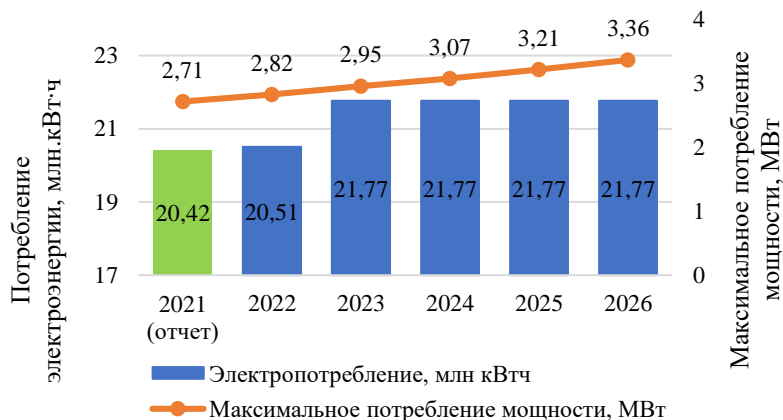


Рис. 3. Прогнозируемая динамика годового электропотребления и максимального потребления мощности на перспективу 2022-2026 гг.

Fig. 3. Forecasted dynamics of annual power consumption and maximum power consumption for the future 2022-2026

Величина годового электропотребления в 2026 г. прогнозируется на уровне 21,77 млн кВт·ч, что на 1,35 млн кВт·ч (+6,20 %) выше электропотребления 2021 г. Величина максимального потребления мощности в 2026 г. в соответствии с прогнозом составит 3,36 МВт, что на 0,65 МВт (+19,35 %) выше аналогичного показателя 2021 г. Таким образом, в рассматриваемом перспективном периоде значительного роста потребления электрической энергии и мощности в энергоузле не прогнозируется.

На основе представленных прогнозов потребления электроэнергии и мощности, а также с учетом состава генерирующих источников в энергоузле сформированы перспективные балансы мощности и электроэнергии на период 2022-2026 гг. Балансы мощности и электрической энергии по электростанциям Соболевского изолированного энергоузла на пятилетний период представлены ниже в табл. 8, 9.

Анализ прогнозируемых балансов мощности электростанций Соболевского изолированного энергоузла показал, что по всем генерирующим объектам, баланс мощности складывается с избытком установленной мощности на всем рассматриваемом перспективном периоде.

Таблица 8.
Прогнозируемый баланс мощности на период 2022-2026 гг.

Table 8.
Projected power balance for the period 2022-2026

Населенный пункт	Наименование ген. источника	Наименование показателя	Единица измерения	2021 (отчет)	2022	2023	2024	2025	2026
с. Соболево и с. Устьевое		P_{\max}	МВт	2,25	2,36	2,48	2,60	2,73	2,87
	ГДЭС-7 (с. Соболево)	$P_{\text{уст}}$	МВт	4,67	4,67	5,46	5,46	5,46	5,46
	РДГ Устьевое (с. Устьевое)	$P_{\text{уст}}$	МВт	0,00	0,00	0,60	0,60	0,60	0,60
		Дефицит/избыток	МВт	2,35	3,85	3,28	3,10	3,10	3,10
			%	108	98	144	133	122	111
п. Крутогоровский	ГДЭС-21	P_{\max}	МВт	0,42	0,42	0,43	0,43	0,44	0,45
		$P_{\text{уст}}$	МВт	2,34	2,34	2,34	2,48	2,48	2,48
		Дефицит/избыток	МВт	1,92	1,92	1,91	2,05	2,04	2,03
			%	457	457	444	477	464	451
п. Ичинский	ДЭС-22	P_{\max}	МВт	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
		$P_{\text{уст}}$	МВт	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
		Дефицит/избыток	МВт	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
			%	500	500	500	500	500	500
Суммарный баланс мощности Соболевский энергоузел		P_{\max}	МВт	2,71	2,82	2,95	3,07	3,21	3,36
		$P_{\text{уст}}$	МВт	7,25	7,25	8,64	8,78	8,78	8,78
		Дефицит/избыток	МВт	4,54	4,43	5,69	5,71	5,57	5,42
			%	168	157	193	186	174	161

Балансы электроэнергии всех источников анализируемого энергоузла складываются удовлетворительно. Числа часов использования (ЧЧИ) установленной мощности электрических станций энергоузла находятся в допустимых пределах.

Таблица 9.
Прогнозируемый баланс электрической энергии на период 2022-2026 гг.

Table 9.
Projected balance of electric energy for the period 2022-2026

Населенный пункт	Наименование ген. источника	Наименование показателя	Единица измерения	2021 г. (отчет)	2022	2023	2024	2025	2026
с. Соболево и с. Устьевое	ГДЭС-7 (с. Соболево)	Выработка	млн. кВт·ч	12,84	15,76	15,76	15,76	15,76	15,76
		ЧЧИ	час	2 749	3 375	3 375	3 375	3 375	3 375
	РДГ Устьевое (с. Устьевое)	Выработка	млн. кВт·ч	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ЧЧИ	час	0	0	0	0	0	0
п. Крутоголовский	ГДЭС-21	Выработка	млн. кВт·ч	7,19	7,19	7,19	7,19	7,19	7,19
		ЧЧИ	час	3 073	3 073	3 073	2 900	2 900	2 900
п. Ичинский	ДЭС-22	Выработка	млн. кВт·ч	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
		ЧЧИ	час	5 746	5 746	5 746	5 746	5 746	5 746
Суммарный баланс электроэнергии Соболевский энергоузел		Выработка	млн. кВт·ч	21,41	24,33	24,33	24,33	24,33	24,33

Основные варианты развития системы электроснабжения Соболевского энергоузла рассматривались с учетом проведенного анализа, целесообразности реконструкции имеющихся ДЭС и возможности использования возобновляемых источников электроэнергии на данной территории.

Особенностью функционирования Соболевского изолированного энергоузла является возможность использования местного природного газа. Это позволяет снизить зависимость от дорогостоящего привозного дизельного топлива и, соответственно, стабилизировать экономические обоснованный тариф на электроснабжение, несмотря на высокие эксплуатационные затраты, связанные с климатическими и географическими факторами. Кроме того, использование местных энергоресурсов и снижение зависимо-

сти от привозного топлива повышает надежность электроснабжения Соболевского изолированного энергоузла [8, 15]. Оценка экономической эффективности мероприятий по замене высокочатратных ДЭС на новые с доведением удельного расхода топлива на отпуск электроэнергии до оптимальных значений показала целесообразность замены ДЭС в п. Ичинский. Проведенные расчеты показали, что срок окупаемости капиталовложений на обновление ДЭС-22 составит около 6 лет.

Оценка параметров и основных показателей электроснабжения Соболевского изолированного энергоузла при использовании солнечных электростанций (СЭС) показала их низкую эффективность на данной территории. Показатель себестоимости производства электроэнергии на СЭС значительно выше существующего.

Расчеты укрупненной оценки экономической эффективности применения СЭС в Соболевском изолированном энергоузле на основе данных о себестоимости производства электроэнергии на СЭС и сравнение с существующей топливной составляющей себестоимости производства электроэнергии показали, что на территории рассматриваемого изолированного энергоузла строительство СЭС экономически нецелесообразно.

Результаты проведенного расчета параметров мощности, выработки и экономии стоимости электроэнергии на основе сравнения с существующей топливной составляющей себестоимости производства электроэнергии для населенных пунктов Соболевского изолированного энергоузла и полученные значения приведены в табл. 10 [4, 16].

С целью повышения эффективности электроснабжения Соболевского изолированного энергоузла также целесообразно рассмотреть возможность строительства ветряных электростанций (ВЭС) на его территории. По данным наблюдений среднегодовая скорость ветра в населенных пунктах Соболевского изолированного энергоузла на высоте 30 м составляет около 5,5 м/с [17].

В соответствии с опытом эксплуатации ВЭС в п. Усть-Камчатск Камчатского края значение коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) для ВЭС при расчетах принимается на уровне 15 %. Расчет экономической эффективности строительства ВЭС для населенных пунктов с наибольшим ветроэнергетическим потенциалом Соболевского изолированного энергоузла показал, что себестоимость производства электроэнергии на ВЭС составит около 11 руб./кВтч.

Расчет удельной экономии стоимости электроэнергии за счет ввода ВЭС на базе сравнения себестоимости электроэнергии ВЭС с существующей топливной составляющей себестоимости производства электроэнергии приведен в табл. 11.

Таблица 10.
Оценка экономической эффективности использования СЭС
в Соболевском изолированном энергоузле

Table 10.
Assessment of the economic efficiency of the use of solar power plants
in the Sobolevsky isolated power hub

Населенный пункт	Мощность СЭС, кВт	Выработка СЭС, млн кВт·ч	Капиталовложения, тыс. руб.	Себестоимость производства э/э на СЭС, руб/кВт·ч	Топливная Составляющая себестоимости э/э, руб/ кВт·ч	Удельная экономия стоимости э/э за счет ввода СЭС, руб/ кВт·ч
с. Соболево	6 092	5,813	615 895	15,0	5,2	-9,8
п. Крутого- ровский	3 518	3,456	355 631	14,6	9,2	-5,4
п. Ичинский	675	0,663	68 200	14,6	14,8	0,2

Таблица 11.
Оценка экономической эффективности использования ВЭС
в Соболевском изолированном энергоузле

Table 11.
Estimation of economic efficiency of WPP use
in the Sobolevsky isolated power hub

Населенный пункт	Мощность ВЭС, кВт	Капиталовложе- ния, тыс. руб	Себестоимость производства э/э на ВЭС, руб/ кВт·ч	Топливная составляющая себестоимости э/э, руб/ кВт·ч	Удельная эконо- мия стоимости э/э за счет ввода ВЭС, руб/ кВт·ч
с. Соболево	6 092	54 671	10,9	5,2	-5,7
п. Крутого- ровский	3 518	10 934	10,9	9,2	-1,7
п. Ичинский	675	164 013	10,9	14,8	3,9

Из табл. 11 видно, что наиболее перспективным проектом может быть строительство ВЭС в п. Ичинский. Однако опыт эксплуатации ВЭС на

территории Камчатского края показывает, что в этом случае также необходимо наличие надежного независимого источника электроснабжения в виде ДЭС. Поэтому затраты на эксплуатацию возрастают, и фактическая удельная экономия стоимости электроэнергии при использовании ВЭС будет ниже расчетной.

С учетом мирового опыта и опыта организации электроснабжения потребителей Камчатского края, наиболее перспективным вариантом развития изолированных энергоузлов является строительство малых ГЭС. Реальный для использования экономический потенциал речных гидроресурсов Камчатки составляет около 5 млрд. кВт·ч в год [3, 9].

Оценка экономической эффективности строительства малых ГЭС для целей электроснабжения Соболевского изолированного энергоузла и расчет себестоимости производства электроэнергии на малых ГЭС показали, что в этом случае КИУМ является максимальным и достигает 45 %, а себестоимость производства электроэнергии составит менее 4 руб./кВт·ч. Таким образом, величина топливной составляющей себестоимости электроэнергии, производимой ГДЭС незначительно выше гидроэнергии, в то время как себестоимость электроэнергии ДЭС выше в несколько раз [5, 7].

На основе сравнения себестоимости электроэнергии малых ГЭС и действующей топливной составляющей себестоимости электроэнергии в рассматриваемых населенных пунктах можно сделать вывод, что применение малых ГЭС в Соболевском изолированном энергоузле на данном этапе нецелесообразно.

IV. Выводы

Результаты, представленные в данной работе, согласуются с результатами исследований российских и зарубежных ученых [18, 19] и подтверждают необходимость поиска оптимального баланса между генерацией и потреблением электроэнергии, а также более широкого использования местных возобновляемых источников электроэнергии. На основании перспективного прогноза электропотребления в энергоузле и данных, представленных энергокомпаниями разработаны основные направления оптимизации системы электроснабжения.

В настоящее время в системе электроснабжения Соболевского изолированного энергоузла для повышения экономической эффективности рекомендуется в первую очередь решить проблему низкорентабельной ДЭС в п. Ичинский. Проведенные технико-экономические расчеты показали, что в данном случае является экономически целесообразным замены существующей ДЭС на новую. Для повышения надежности электроснабжения потребителей в п. Устевое требуется реконструкция ВЛ 35 кВ с заменой провода на самонесущий изолированный провод в связи с большими ветровыми

нагрузками и прохождением ВЛ вблизи Охотского моря. Кроме того, целесообразно в п. Устевое установить в качестве дополнительного источника электроэнергии резервный дизель-генератор (РДГ) мощностью 0,6 МВт.

Таким образом, для повышения эффективности электроснабжения в Соболевском изолированном энергоузле необходимо разработать и реализовать мероприятия по максимальному использованию местного природного газа, а также заменить устаревшее оборудование на существующих станциях. Принимая во внимание высокие капитальные затраты на реализацию инновационных проектов развития, можно сделать вывод о необходимости поддержки федерального бюджета и включении ряда предлагаемых мероприятий в профильные федеральные программы.

© Белов О.А., 2023

Поступила в редакцию 03.10.2022

Received 03.10.2022

Библиографический список

- [1] Белов О.А. Состояние электроэнергетики Камчатского края и перспективы ее развития // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2021. Т. 21. № 4. С. 48-56. DOI: 10.14529/power210406
- [2] Белов О.А. Анализ структуры генерирующей мощности в изолированных энергоузлах Камчатского края // II Всерос. науч.-практ. конф. «Энергетика будущего – цифровая трансформация», Декабрь 15-16, 2021, Липецк, Россия: Липецкий государственный технический университет, 2021. С. 281-286.
- [3] Антонов Н.В., Евдокимов М.Ю., Шилин В.А. Возобновляемая энергетика за рубежом и в регионах России // Географическая среда и живые системы. 2020. № 1. С. 85-99. DOI: 10.18384/2712-7621-2020-1-85-99
- [4] Безруких П.П. Нетрадиционно возобновляемые источники энергии. М.: Топливо-энергетический комплекс, 2002. – 120 с.
- [5] Bezrukikh P.P. On some issues assessing the efficiency of renewable energy power plants and the share of renewables in the world's electricity generation // Journal of Electrical Engineering. 2018. № 6. P. 85-89. DOI: 10.17265/2328-2223/2018.02.004
- [6] Tyagunov M.G., Lin Z.Y. Determining the optimal placements of renewable power generation systems using regional geographic information system // 2nd International conference on the applications of information technology in developing renewable energy processes and systems, IT-DREPS 2017, Dec. 06-08, 2017, Amman, Jordan: IEEE, 2017. P. 1-6. DOI: 10.1109/IT-DREPS.2017.8277823
- [7] Тягунов М.Г. Особенности работы установок на основе возобновляемых источников энергии в изолированных энергосистемах // Альтернативная энергетика в регионах России: Материалы молодежной научной конференции «АЭР-2018», Декабрь 05-07, 2018, Астрахань, Россия: ИП Сорокин Роман Васильевич, 2018. С. 40-44.

- [8] Кротенко Д.С., Семчев В.А., Белов О.А., Жуков С.А. Анализ перспективного развития энергообеспечения Камчатского края // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2020. № 51. С. 6-11.
DOI: 10.17217/2079-0333-2020-51-6-11
- [9] Семчев В.А. О перспективах и проблемах развития гидроэнергетики в Камчатском крае // Горный вестник Камчатки. 2017. № 2 (38). С. 36-43.
- [10] Лукутин Б.В., Киушкина В.Р. Характеристики энергетической безопасности децентрализованного района и автономного объекта электрификации // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 1 (156). С. 66-79. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-1-66-79
- [11] Воскобоев В.Ф., Лебедев А.Ю., Рынин А.Ю., Слепушкин С.Б. Оценка устойчивости функционирования объектов электроэнергетики // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. 2005. № 7. С. 169-176.
- [12] Голубцов Н.В., Федоров О.В. Энергоэффективность экономики в аспекте инновационного инженерного образования // IX Всерос. науч.-практ. конф. «Наука, образование, инновации: пути развития», Май 22-24, 2018, Петропавловск-Камчатский, Россия: Камчатский государственный технический университет, 2018. С. 135-139.
- [13] Musaev T., Khabibullin M., Kamaliev R., Fedorov O., Valeev I., Vladimirov O. Influence of smart metering systems on increasing the accuracy of calculation electrical power losses in electrical networks // 2020 Sustainable Energy Systems: Innovative perspectives (SES 2020), Oct. 29-30, 2020, Saint-Petersburg, Russia: EDP Sciences, 2020. P. 01026. DOI: 10.1051/e3sconf/202022001026
- [14] Мусаев Т.А., Федоров О.В., Шагеев С.Р., Прохорова М.В. Интеллектуальные системы учета как инструмент снижения потерь электрической энергии // Строительство: новые технологии – новое оборудование. 2021. № 2. С. 52-55.
- [15] Никитин А.Т., Белов О.А. Перспективы развития малой энергетики как экологичной технологии // Материалы науч.-практ. конф. «Образование, наука и молодежь – 2017», Октябрь 26, 2017, Керчь, Россия: Керченский государственный морской технологический университет, 2017. С. 268-272.
- [16] Semenov A., Volotkovskaya N., Bebikhov Y., Yakushev I., Fedorov O., Gracheva E. Analysis of the efficiency of development scenarios for the energy complex of the north-east of Russia // International conference «Sustainable energy systems: innovative perspectives», Oct. 29-30, 2020, Saint-Petersburg, Russia: Springer, Cham, 2021. P. 231-240. DOI: 10.1007/978-3-030-67654-4_26
- [17] Зайченко В.М., Соловьев Д.А., Чернявский А.А. Перспективные направления развития энергетики России в условиях перехода к новым энергетическим технологиям // Окружающая среда и энерговедение. 2020. № 1 (5). С. 33-47.
- [18] Weinand J.M., Scheller F., McKenna R. Reviewing energy system modelling of decentralized energy autonomy // Energy. 2020. № 41.
DOI: 10.1016/j.energy.2020.117817
- [19] Zaroni H., Maciel L.B., Carvalho D.B., Pamplona E. Monte Carlo simulation approach for economic risk analysis of an emergency energy generation system // Energy. 2019. № 172. P. 498-508. DOI: 10.1016/j.energy.2019.01.145

References

- [1] O.A. Belov, “The state of the electric power industry of the Kamchatka region and its development prospects”, *Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy*, vol. 21, no. 4, pp. 48-56, 2021. DOI: 10.14529/power210406
- [2] O.A. Belov, “Analiz struktury generiruyushchey moshchnosti v izolirovannykh energouzlakh Kamchatskogo kraya [Analysis of the structure of generating capacity in isolated energy centers of the Kamchatka Territory]”, in proc. *II All-Russian conf. «Energetika budushchego – cifrovaya transformatsiya [II All-Russia. scientific-practical. conf. "Energy of the Future - Digital Transformation"]*, Dec. 15-16, 2021, Lipetsk, Russia, pp. 281-286 (in Russian).
- [3] N.V. Antonov, M. Yu. Evdokimov and V.A. Shilin, “Renewable energy abroad and in Russian regions”, *Geographical environment and living systems*, no. 1, pp. 85-99, 2020. DOI: 10.18384/2712-7621-2020-1-85-99
- [4] P.P. Bezrukikh, *Netraditsionno vozobnovlyaemye istochniki energii [Unconventional renewable energy sources]*. Moscow: Toplivno-energiya complex, 2002 (in Russian).
- [5] P.P. Bezrukikh, “On some issues assessing the efficiency of renewable energy power plants and the share of renewables in the world’s electricity generation”, *Journal of Electrical Engineering*, no. 6, pp. 85-89, 2018. DOI: 10.17265/2328-2223/2018.02.004
- [6] M.G. Tyagunov and Z.Y. Lin, “Determining the optimal placements of renewable power generation systems using regional geographic information system”, in proc. *2nd International conference on the applications of information technology in developing renewable energy processes and systems, IT-DREPS 2017*, Dec. 06-08, 2017, Amman, Jordan, pp. 1-6. DOI: 10.1109/IT-DREPS.2017.8277823
- [7] M.G. Tyagunov, “Features of work of installations on the basis of renewables in the isolated power supply systems”, in proc. *Alternative energy in the regions of Russia: Proceedings of the youth scientific conference "AER-2018"*, Dec. 05-07, 2018, Astrakhan, Russia, pp. 40-44.
- [8] D.S. Krotenko, V.A. Semchev, O.A. Belov and S.A. Zhukov, “Analysis of future energy supply development in Kamchatka”, *Bulletin of the Kamchatka State Technical University*, no. 51, pp. 6-11 DOI: 10.17217/2079-0333-2020-51-6-11
- [9] V.A. Semchev, “O perspektivakh i problemakh razvitiya gidroenergetiki v Kamchatskom kraye [On the prospects and problems of hydropower development in the Kamchatka Territory]”, *Gornyj vestnik Kamchatki [Mining Bulletin of Kamchatka]*, vol. 2, no. 38, pp. 36-43, 2017 (in Russian).
- [10] B.V. Lukutin and V.R. Kiushkina, “The characteristics of energy security in decentralised zones and autonomous objects of electrification”, *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*, vol. 25, no. 1 (156), pp. 66-79, 2021. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-1-66-79
- [11] V.F. Voskoboev, A.Yu. Lebedev, A.Yu. Rynin and S.B. Slepushkin, “Otsenka ustoychivosti funktsionirovaniya ob"yektov elektroenergetiki [Estimation of the stability of the functioning of electric power facilities]”, *Voprosy teorii bez-opasnosti i ustojchivosti sistem [Questions of the theory of safety and stability of systems]*, no. 7, pp. 169-176, 2005 (in Russian).

- [12] N.V. Golubtsov and O.V. Fedorov, "Energy efficiency of economics in the aspect of innovative engineering education", in proc. *IX Vseros. scientific-practical. conf. "Science, education, innovation: ways of development"*, May 22-24, 2018, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, pp. 135-139.
- [13] T. Musaev, M. Khabibullin, R. Kamaliev, O. Fedorov, I. Valeev and O. Vlsdimirov, "Influence of smart metering systems on increasing the accuracy of calculation electrical power losses in electrical networks", in proc. *2020 Sustainable Energy Systems: innovative perspectives (SES 2020)*, Oct. 29-30, 2020, Saint-Petersburg, Russia, pp. 01026. DOI: 10.1051/e3sconf/202022001026
- [14] T.A. Musaev, O.V. Fedorov, S.R. Shageev and M.V. Prokhorova, "Intellektual'nye sistemy ucheta kak instrument snizheniya poter' elektricheskoy energii [Intelligent metering systems as a tool to reduce electrical energy losses]", *Stroitel'stvo: novye tekhnologii - novoe oborudovanie [Construction: new technologies - new equipment]*, no.2, pp. 52-55, 2021 (in Russian).
- [15] A.T. Nikitin and O.A. Belov, "Development prospects small power engineering as environmental technology", in proc. *Materials of scientific-practical. conf. "Education, Science and Youth - 2017"*, Oct. 26, 2017, Kerch, Russia, pp. 268-272.
- [16] A. Semenov, N. Volotkovskaya, Y. Bebikhov, I. Yakushev, O. Fedorov and E. Gracheva, "Analysis of the efficiency of development scenarios for the energy complex of the north-east of Russia", in proc. *International conference "Sustainable energy systems: innovative perspectives"*, Oct. 29-30, 2020, Saint-Petersburg, Russia, pp. 231-240. DOI: 10.1007/978-3-030-67654-4_26
- [17] V.M. Zaichenko, D.A. Soloviev and A.A. Chernyavsky, "Prospective directions of Russian electric power industry development within the framework of transition to new energy technologies", *Environment and Energy Science*, vol. 1, no. 5, pp. 33-47, 2020.
- [18] J.M. Weinand, F. Sheller and R. Mckenna, "Reviewing energy system modelling of decentralized energy autonomy", *Energy*, no. 41, Apr. 2020. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117817
- [19] H. Zaroni, L.B. Maciel, D.B. Carvalho and E. Pamplona, "Monte Carlo Simulation approach for economic risk analysis of an emergency energy generation system", *Energy*, no. 172, pp. 498-508, Apr. 2019. DOI: 10.1016/j.energy.2019.01.145

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Белов Олег Александрович, кандидат технических наук, доцент Камчатского государственного технического университета, Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация.

Oleg A. Belov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation.

ХРОНИКА

ЛОСКУТОВУ АЛЕКСЕЮ БОРИСОВИЧУ – 70 ЛЕТ



31 января отметил юбилей Алексей Борисович Лоскутов, доктор технических наук, профессор, главный редактор журнала «Интеллектуальная электротехника»

В 1976 г. Алексей Борисович, будучи выпускником Горьковского политехнического института, начал свою трудовую деятельность ассистентом кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» (с 2013 г. – кафедра «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника»). После защиты в 1985 г. кандидатской диссертации прошел все ступени преподавательской карьеры (старший преподаватель, доцент, профессор) и в 1993 г. возглавил кафедру.

В 1995 г. А.Б. Лоскутов защитил докторскую диссертацию. С 2004 по 2011 г. занимал должность проректора по научной работе и первым проректора Нижегородского государственного технического университета

им. Р.Е. Алексеева. Эту работу он совмещал с должностью заведующего кафедрой. С 2018 г. А.Б. Лоскутов – профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» НГТУ.

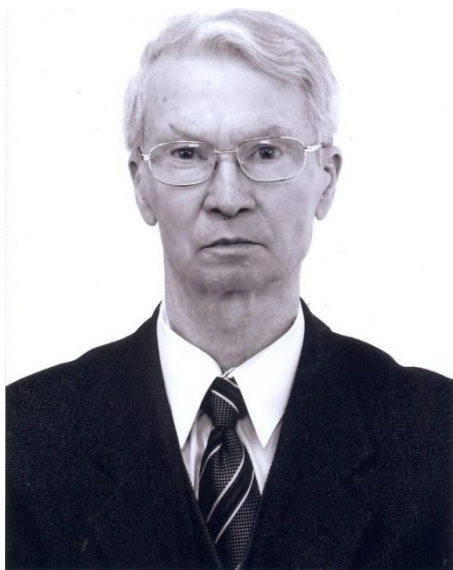
В 2018 г. Алексей Борисович организовал и возглавил научно-технический журнал «Интеллектуальная электротехника», в 2022 г. включенный в перечень рецензируемых научных изданий ВАК, рекомендованных для публикации научных результатов диссертаций.

А.Б. Лоскутов – известный в России и за рубежом ученый-энергетик, внесший значительный вклад в развитие таких направлений современных систем электроснабжения, как интеллектуальные электрические сети, цифровые подстанции, малая и возобновляемая энергетика.

Деятельность А.Б. Лоскутова отмечена множеством наград. Алексей Борисович – дважды лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники (в 2002 г. – за разработку программы энергосбережения в системе Министерства образования и науки России, в 2020 г. – за разработку и внедрение инновационных технологий и оборудования для управления и повышения надежности цифровых электрических сетей).

В 2007 г. А.Б. Лоскутову присвоено звание «Почетный работник Министерства образования и науки РФ». Он награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени.

*Редакционная коллегия и редакция
журнала «Интеллектуальная электротехника»
поздравляют Алексея Борисовича,
желают ему здоровья и успехов
в его плодотворной деятельности!*

ВАГИНУ ГЕННАДИЮ ЯКОВЛЕВИЧУ – 85 ЛЕТ

10 марта 2023 г. исполнилось 85 лет заслуженному деятелю науки РФ, доктору технических наук, профессору Геннадию Яковлевичу Вагину.

Геннадий Яковлевич Вагин родился в г. Городце Горьковской области в 1938 г. В 1956 г., по окончании Дзержинского химико-механического техникума, начал свою трудовую деятельность в должности энергетика на одном из предприятий Госматериальных резервов в г. Котельниче Кировской области. С 1959 по 1962 г. он работал наладчиком электротехнологического оборудования на Заволжском моторном заводе, а в 1963-1966 гг. был руководителем группы проектировщиков в отделе электроснабжения Горьковского отделения института «Электропроект».

В 1965 г. Г.Я. Вагин без отрыва от производства окончил Горьковский политехнический институт по специальности «Электрификация промышленных предприятий и установок». В 1966 г. он был избран ассистентом кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» ГПИ им. А.А. Жданова. С 1967 по 1970 гг. Геннадий Яковлевич обучался в аспирантуре на данной кафедре под руководством профессора Ю.Л. Муко-сеева и в 1970 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Вопросы электроснабжения машин контактной сварки машиностроительной промышленности».

В последующие годы Геннадий Яковлевич работал старшим преподавателем, а затем доцентом кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов», с 1972 по 1976 гг. был заместителем декана электротехнического факультета. В 1976 г. Г.Я. Вагин был избран заведующим кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» и возглавлял ее до 1994 г.

В 1985 г. Г.Я. Вагин защитил докторскую диссертацию на тему «Оптимальное построение систем электроснабжения предприятий с электросварочными установками (теория, методы расчета и проектирования)» в Институте электродинамики АН УССР. В 1986 г. ему было присвоено звание профессора по кафедре электроснабжения промышленных предприятий и городов. С 1994 г. по настоящее время Геннадий Яковлевич является профессором кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника».

Геннадий Яковлевич Вагин – признанный специалист по электроснабжению электротехнологических установок, электромагнитной совместимости и экономии энергоресурсов, известный в России и за рубежом. Он автор 17-ти патентов. Г.Я. Вагин опубликовал более 300 статей и докладов в отечественных и зарубежных изданиях, выпустил 16 монографий (пять из них изданы за рубежом – в Болгарии, на Украине, в Эстонии), подготовил 26 учебных пособий и 5 учебников для вузов. Под научным руководством Г.Я. Вагина защищены 11 кандидатских диссертаций и одна докторская.

Результаты исследований Г.Я. Вагина в области электроснабжения предприятий с электросварочной нагрузкой вошли во все учебники и справочники по электроснабжению промышленных предприятий. Эти работы были использованы при проектировании и реконструкции заводов АвтоВАЗ, КамАЗ, ГАЗ и др. Под руководством Г.Я. Вагина была разработана и смонтирована первая в СССР установка продольной компенсации в сварочных сетях на заводе «Красный Якорь».

За цикл работ по электроснабжению электротехнологических установок Г.Я. Вагину, совместно с группой украинских ученых, в 1989 г. была присуждена премия Академии наук Украинской ССР в области энергетики им. академика Г.Ф. Проскуры.

Глубокие исследования проведены под руководством Г.Я. Вагина в области электромагнитных помех и электромагнитной совместимости электроприемников. По их результатам опубликованы монография «Электромагнитная совместимость электроприемников промышленных предприятий» (1992 г.) и учебник для вузов «Электромагнитная совместимость в электроэнергетике» (2010 г.). Кроме того, разработаны два прибора для ана-

лиза электромагнитных помех – «Фликерметр» и «Измеритель токов коротких замыканий», отмеченные медалями ВДНХ и дипломами на международной выставке стран СЭВ в г. Пловдив в 1989 г.

С 1986 по 1992 г. профессор Г.Я. Вагин был членом советской рабочей группы технического комитета 77-й Международной электротехнической комиссии по стандартизации электромагнитных помех и принимал активное участие в разработке международных и отечественных стандартов по электромагнитной совместимости.

Геннадий Яковлевич Вагин создал в Нижнем Новгороде научную школу по экономии энергоресурсов. С 1982 по 1992 г. он являлся председателем городской секции по этой тематике, а в 1994 г. по его инициативе была организована подготовка специалистов по экономии энергоресурсов на базе кафедры «Электроэнергетика и электроснабжение».

Профессор Г.Я. Вагин принимал активное участие в разработке четырех программ федерального значения:

- системы паспортизации энергосбережения предприятий различных отраслей промышленности (2002 г.);
- технологий и методов повышения энергоресурсоэффективности в промышленности, сельском и жилищно-коммунальном хозяйстве (2003 г.);
- снижения энергоемкости продукции предприятий оборонно-промышленного комплекса (2004-2005 гг.);
- концепции применения мини-ТЭЦ в России (2006 г.).

За разработку проектов мини-ТЭЦ нового поколения Геннадий Яковлевич Вагин награжден медалью «Инженерная слава». Патент «Система пуска газопоршневого агрегата мини-ТЭЦ» получил серебряную медаль на XXXIX-м международном салоне изобретений в Женеве.

За успешную научно-педагогическую деятельность Геннадий Яковлевич награжден нагрудными знаками «За отличные успехи в работе» и «Почетный работник высшего профессионального образования РФ». В 2003 году ему было присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации».

Г.Я. Вагин является экспертом Аналитического центра при Правительстве РФ по вопросам модернизации и технологического развития экономики России.

Сердечно поздравляем Геннадия Яковлевича с юбилеем, желаем крепкого здоровья, новых творческих успехов, неиссякаемой энергии и прекрасного настроения.

Друзья, коллеги

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

SMART ELECTRICAL ENGINEERING

№ 1

Nizhny Novgorod 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 Smimov	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>

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

ISSN 2658-6754

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

CONTENT

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS	4
A.V. Serov, M.V. Andryukhin, V.G. Titov, G.B. Onishchenko, T.E. Murtazin. Intercomparison of methods to adjust controls of permanent magnets synchronous motor control system	4
S.Y. Eremochkin, D.V. Dorokhov. Modeling of electromechanical characteristics of squirrel cage induction motor with vector-algorithmic control in Matlab Simulink	22
T.Kh. Abuzyarov, A.S. Plekhov, V.G. Titov, I.V. Kolchik. Reduction of output voltage ripple of dual inverter-fed stepper drive at low speed	38
V.G. Sugakov, O.S. Khvatov, A.A. Toshchev, L.V. Zobov. Automatic control systems for excitation of synchronous generators of autonomous power sources with external boost	51
POWER INDUSTRY	62
Yu.N. Bulatov, A.V. Kryukov, K.V. Suslov. Voltage regulation in DC and AC microgrid based on energy routers and energy storages	62
M.I. Toshkhodzhaeva. Simulation of main parameters of electric power system with distributed generation source under different mode	85
T.G. Klimova and V.S. Smirnov. Estimation of parameters of two-winding transformer equivalent circuit based on PMU	102
O.A. Belov. Structure analysis of generating power and electrical consumption dynamics of Sobolevsky isolated power hub of Kamchatka territory	118
CHRONICLE	139
Alexey Borisovich Loskutov (to the 70-th anniversary of birth)	139
Gennady Yakovlevich Vagin (to the 85-th anniversary of birth)	141

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 1

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

Редакция:

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

Свободная цена

Подписано в печать 21.03.2023. Дата выхода в свет: 29.03.2023

Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

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

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

Адрес университета и типографии:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24