

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

УДК 621.311

<https://doi.org/10.17816/transsyst624890>

© И.Д. Карабаджак, В.В. Никитин

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

ВАРИАНТЫ СТРУКТУРЫ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С БАТАРЕЕЙ ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Обоснование. В последние годы резко возрос интерес к проблеме сокращения выброса продуктов сжигания углеводородного топлива в атмосферу и использованию альтернативных и возобновляемых источников энергии. Данная проблема является актуальной как для стационарной, так и для транспортной энергетики. Одним из путей снижения вредного воздействия на окружающую среду первичных источников энергии в автономных транспортных энергоустановках является их гибридизация, т.е. использование наряду с традиционными источниками энергии (турбогенераторами и дизель-генераторами) водородных источников электроэнергии (батарей топливных элементов).

Цель. Обоснование оптимального варианта структуры автономной электро-энергетической системы с комбинированной энергоустановкой на основе водородных источников электроэнергии.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели использован сравнительный анализ параметров и характеристик элементов энергосистемы, а также метод моделирования процессов в исследуемой энергосистеме с использованием пакета MATLAB Simulink. Рассматриваются два варианта структуры автономной электроэнергетической системы – с общей шиной переменного и постоянного тока. Анализ параметров и характеристик этих вариантов выполнен для трех типовых режимов работы: включения статической нагрузки, прямого пуска асинхронного двигателя с нагрузкой на валу и перевода потребителей с питания от дизель-генератора на питание от батареи водородных топливных элементов.

Результаты. Во всех рассматриваемых режимах батарея ВТЭ характеризуется быстрым откликом на изменение нагрузки и стабильным КПД. Характер переходных процессов апериодический или малоколебательный, быстро затухающий. По количеству полупроводниковых преобразователей, фильтрующих устройств и их суммарной мощности более предпочтительной является структура автономной энергосистемы с общей шиной переменного тока.

Ключевые слова: автономная электроэнергетическая система; водородный топливный элемент.

Как цитировать:

Карабаджак И.Д., Никитин В.В. Варианты структуры автономной электроэнергетической системы с батареей водородных топливных элементов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 1. С. 59–75. <https://doi.org/10.17816/transsyst624890>

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© I.D. Karabadzhack, V.V. Nikitin

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

OPTIONS FOR THE STRUCTURE OF AN AUTONOMOUS ELECTRIC POWER SYSTEM WITH A BATTERY OF HYDROGEN FUEL CELLS

Background. Recently, interest in the problem of reducing the emissions of hydrocarbon fuel combustion products into the atmosphere and the use of alternative and renewable energy sources has sharply increased. This problem is relevant to both stationary and transport energy. One of the ways to reduce the harmful impact of primary energy sources in autonomous transport power plants on the environment is their hybridization, i.e., use, along with traditional energy sources (turbogenerators and diesel generators), of hydrogen sources of electricity (fuel cell batteries).

Aim. This study presents a justification of the optimal variant of the structure of an autonomous electric power system with a combined power plant based on hydrogen sources of electricity.

Materials and Methods. To achieve this goal, a comparative analysis of the parameters and characteristics of the power system elements was performed, as well as a method for modeling processes in the power system under study using the MATLAB Simulink package. Two options for the structure of an autonomous electric power system are being considered, namely, a common AC and DC bus. An analysis of the parameters and characteristics of these options was performed for three typical operating modes, namely, turning on a static load, direct starting of an asynchronous motor with a load on the shaft, and transferring consumers from power from a diesel generator to power from a battery of hydrogen fuel cells.

Results. In all considered modes, the VTE battery is characterized by a rapid response to load changes and stable efficiency. The nature of transient processes is aperiodic or low oscillatory, rapidly decaying. In terms of the number of semiconductor converters, filtering devices, and their total power, the structure of an autonomous power system with a common AC bus is more preferable.

Keywords: autonomous electric power system, hydrogen fuel cell.

To cite this article:

Karabadzhack ID, Nikitin VV. Options for the Structure of an Autonomous Electric Power System with a Battery of Hydrogen Fuel Cells. *Modern Transportation Systems and Technology*. 2024;10(1):59–75. <https://doi.org/10.17816/transsyst624890>

ВВЕДЕНИЕ

Энергоустановки, использующие водород в качестве топлива, являются весьма перспективными источниками энергии, поскольку принципиально позволяют сочетать высокую энергетическую эффективность с сокращением вредных выбросов в атмосферу. Энергия, получаемая при сжигании одного килограмма угля, составляет 34 МДж/кг, для дизельного топлива этот показатель составляет 43 МДж/кг, а для водорода – 120 МДж/кг [1].

В последние два десятилетия интерес к созданию источников электрической энергии с использованием водородных топливных элементов резко возрос; это направление энергетики активно развивается как в сфере разработки стационарных объектов большой и малой энергетики, так и в транспортной сфере. В частности, для крупных транспортных объектов (судов, подвижного состава железных дорог) разработаны и проходят опытную эксплуатацию водородные источники электрической энергии на уровне мощностей в несколько сотен кВт [2–8].

Для энергообеспечения тяговых и вспомогательных нужд автономного моторвагонного подвижного состава в настоящее время используются преимущественно дизельные первичные источники энергии. Ведутся также перспективные разработки гибридного подвижного состава, где в качестве источников энергии используются тяговая аккумуляторная батарея и водородные источники энергии – топливные элементы (ВТЭ). По технико-экономическим оценкам ведущих мировых компаний-производителей железнодорожного подвижного состава затраты на эксплуатацию, пробег между заправками топливом (около 1000 км) и время заправки при пустых баках (около 15 минут) моторвагонного поезда с ВТЭ практически сопоставимы с аналогичными показателями для дизель-поезда. Однако, затраты на организацию необходимой инфраструктуры для заправки подвижного состава водородом более высокие. Для моторвагонных поездов, привод которых питается от тяговых аккумуляторных батарей, затраты на инфраструктуру ниже. Тем не менее, недостаточно высоки показатели пробега между подзарядками батареи (до 200 км), массы и времени зарядки бортовых систем хранения энергии (30–35 тонн и 45 минут соответственно) [9–12].

При разработке автономных электроэнергетических систем с водородными источниками энергии одной из первых задач, подлежащих решению, является задача обоснования структуры энергосистемы.

СТРУКТУРА АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ВОДОРОДНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Рассмотрим автономную электроэнергетическую систему (АЭЭС) транспортного или стационарного исполнения, которая включает в себя основной источник энергии в виде дизель-генераторного агрегата, вырабатывающего энергию трехфазного переменного тока, и вспомогательный источник энергии в виде батареи ВТЭ, вырабатывающий энергию постоянного тока. Потребителями энергии в рассматриваемой системе будут приняты асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (за прототип принят двигатель серии 5А200М4) и статическая нагрузка активно-индуктивного характера. Основные технические характеристики источников и потребителей электрической энергии, входящих в структуру рассматриваемой АЭЭС, представлены в табл. 1.

Поскольку источники энергии в АЭЭС генерируют энергию разного рода тока, для согласования параметров питания потребителей в составе АЭЭС необходимо использование полупроводниковых преобразователей [13–15]. Варианты структуры АЭЭС с общей шиной постоянного и переменного тока представлены на рис. 1.

Таблица 1. Характеристики источников и приемников электрической энергии, входящих в состав рассматриваемой АЭЭС

Table 1. Characteristics of sources and receivers of electrical energy that are part of the considered autonomous electric power system

Параметр	Ед.изм.	Величина
Источники энергии		
Мощность синхронного генератора	кВт	100
Линейное напряжение синхронного генератора	В	400
Мощность батареи топливных элементов	кВт	100
Выходное напряжение батареи топливных элементов при номинальной мощности	В	400
Потребители энергии		
Мощность асинхронного двигателя на валу	кВт	37
КПД асинхронного двигателя	–	0,92
Коэффициент мощности асинхронного двигателя	–	0,85
Мощность статической нагрузки	кВА	30
Коэффициент мощности статической нагрузки	–	0,8

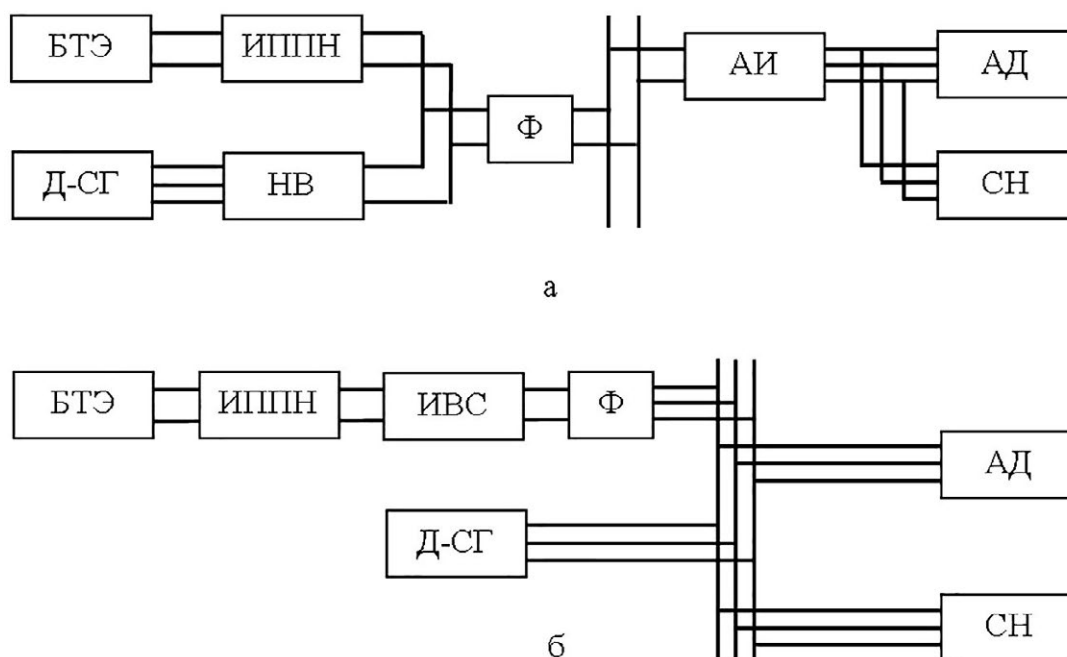


Рис. 1. Структурная схема АЭЭС с общей шиной постоянного (а) и общей шиной переменного (б) тока.

БТЭ – батарея топливных элементов; **Д-СГ** — синхронный дизель-генератор; **ИППН** – импульсный преобразователь постоянного напряжения; **НВ** – неуправляемый выпрямитель; **ИВС** – инвертор, ведомый сетью; **Ф** — фильтр; **АИ** – автономный инвертор; **АД** – асинхронный двигатель; **СН** — статическая нагрузка

Fig. 1. Block diagram of an autonomous electric power system with a common DC bus (a) and a common AC bus (b).

БТЭ – fuel cells battery; **Д-СГ** – synchronous diesel generator; **ИППН** – pulsed DC voltage converter; **НВ** – uncontrolled rectifier; **ИВС** – grid-driven inverter; **Ф** – filter; **АИ** – autonomous inverter; **АД** – asynchronous motor; **СН** – static load

Для структурной схемы с общей шиной постоянного тока (рис. 1а) в составе АЭЭС необходимо иметь импульсный преобразователь постоянного напряжения, рассчитанный на номинальную мощность БТЭ (100 кВт), неуправляемый трехфазный выпрямитель, рассчитанный на номинальную мощность синхронного генератора (100 кВт) и автономный инвертор, рассчитанный на суммарную мощность потребителей (при заданных потребителях – 77 кВА) и допускающий 7,5-кратную перегрузку по току при прямом пуске асинхронного двигателя. Фильтр с учетом возможности подключения к общей шине других приемников энергии необходимо рассчитать на суммарную мощность источников энергии (200 кВт).

Для структурной схемы с общей шиной переменного тока (см. рис. 1б) в составе АЭЭС необходимо иметь импульсный преобразователь

постоянного напряжения и инвертор, ведомый сетью, рассчитанные на мощность БТЭ (100 кВт). Фильтр необходимо рассчитать на выходную мощность канала БТЭ–ИППН–ИВС (100 кВА).

Таким образом, по количеству и суммарной мощности преобразователей энергии и фильтрующих устройств, структура с общей шиной переменного тока для рассматриваемой системы является более предпочтительной.

ПЕРЕХОДНЫЕ И УСТАНОВИВШИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С ВОДОРОДНЫМИ ТОПЛИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Важным элементом сравнительного анализа вариантов структуры АЭЭС является моделирование и анализ переходных и установившихся процессов в системе. Рассмотрим следующие типовые переходные режимы в АЭЭС с дизель-генератором и батареей ВТЭ: включение статической нагрузки при питании от батареи ВТЭ; прямой пуск асинхронного двигателя при включенной статической нагрузке и питании от ВТЭ; перевод питания статической нагрузки и асинхронного двигателя с дизель-генератора на батарею ВТЭ. В качестве критериев сравнения примем следующие показатели: суммарные потери мощности в полупроводниковых преобразователях; качество и длительность переходных процессов; расход топлива (воздух, водород), пульсации и гармонический состав тока батареи ВТЭ; гармонический состав напряжения общей шины.

Исследование указанных типовых режимов выполнено на имитационной модели, реализованной в пакете MATLAB-Simulink.

Режим включения статической нагрузки при питании от батареи ВТЭ. Графики переходных процессов, возникающих при подключении статической нагрузки к батарее ВТЭ представлены на рис. 2. В табл. 2 представлены результаты моделирования по показателям характера и длительности переходных процессов, суммарным потерям мощности в полупроводниковых преобразователях, амплитуде пульсаций и гармоническому составу тока батареи ВТЭ, а также гармоническому составу напряжения общей шины.

Режим прямого пуска асинхронного двигателя при включенной статической нагрузке и питании от батареи ВТЭ. В рассматриваемом режиме совместно с включенной статической нагрузкой ($S = 30$ кВА, $\cos\varphi = 0,8$) к батарее ВТЭ путем прямого пуска подключается асинхронный

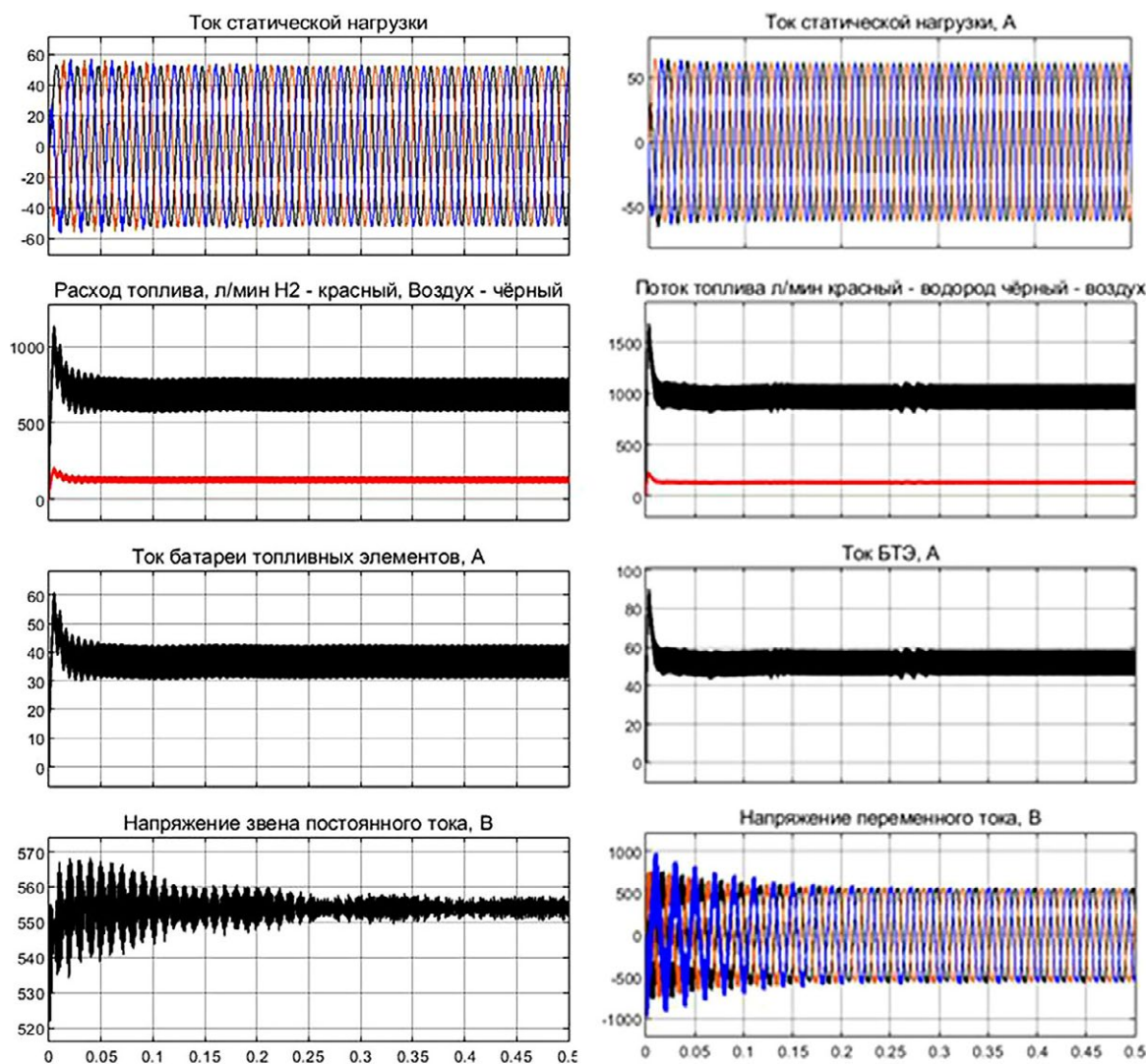


Рис. 2. Переходные процессы при подключении статической нагрузки к батарее ВТЭ в АЭЭС с общей шиной постоянного (а) и переменного (б) тока.

Fig. 2. Transient processes when connecting a static load to a fuel-cells battery in an autonomous electric power system with a common DC (a) and common AC (b) bus

двигатель с нагрузкой на валу в виде турбомеханизма. Нагрузка на валу асинхронного двигателя описывается зависимостью:

$$M_C = M_{C0} + K(n_M / n_{ном})^2,$$

где M_{C0} – начальный (при нулевой скорости вращения) статический момент сопротивления исполнительного механизма ($M_{C0} = 50$ Нм); K – статический момент сопротивления исполнительного механизма при вращении ($K = 200$ Нм); n_M , $n_{ном}$ – текущее и номинальные значения частоты вращения ротора асинхронного двигателя ($n_{ном} = 1467$ об/мин).

Таблица 2. Результаты моделирования режима включения статической нагрузки**Table 2.** Simulation results for static load switching mode

Показатель	АЭЭС с общей шиной постоянного тока	АЭЭС с общей шиной переменного тока
Суммарные потери мощности в преобразователях в установившемся режиме, кВт	0,44	0,23
Длительность переходного процесса*, с	0,2	0,3
Характер переходного процесса*	Апериодический	Апериодический
Средний ток батареи ВТЭ, А	36,9	52,0
Амплитуда пульсаций тока батареи ВТЭ, А	5	5
Коэффициент пульсаций тока батареи ВТЭ	0,135	0,096
Коэффициент гармоник тока батареи ВТЭ (THD_I), %	13,01	10,33
Напряжение общей шины, В**	554	566
Коэффициент гармоник напряжения общей шины (THD_U)	0,38	5,40

*Примечание: здесь и далее длительность и характер переходного процесса оцениваются по изменению напряжения общей шины.

**Примечание: здесь и далее для общей шины постоянного тока дано значение постоянной составляющей, для общей шины переменного тока – действующее значение основной гармоники (50 Гц).

Графики переходных процессов, возникающих в рассматриваемых АЭЭС при прямом пуске асинхронного двигателя, представлены на рис. 3. В табл. 3 представлены результаты моделирования по ряду важных показателей.

Режим перевода питания статической нагрузки и асинхронного двигателя с синхронного дизель-генератора на батарею ВТЭ. Статическая нагрузка и асинхронный двигатель включены и работают в установившемся режиме с номинальными мощностями. Питание нагрузок переводится с синхронного дизель-генератора на батарею ВТЭ в три этапа: на первом этапе нагрузки питает только дизель-генератор, на втором этапе осуществляется совместное питание нагрузок от дизель-генератора и батареи ВТЭ, на третьем этапе нагрузки получают питание только от батареи ВТЭ (дизель-генератор отключен). Графики переходных и установившихся процессов в рассматриваемом режиме представлены на рис. 4. В табл. 4 представлены результаты моделирования; показатели

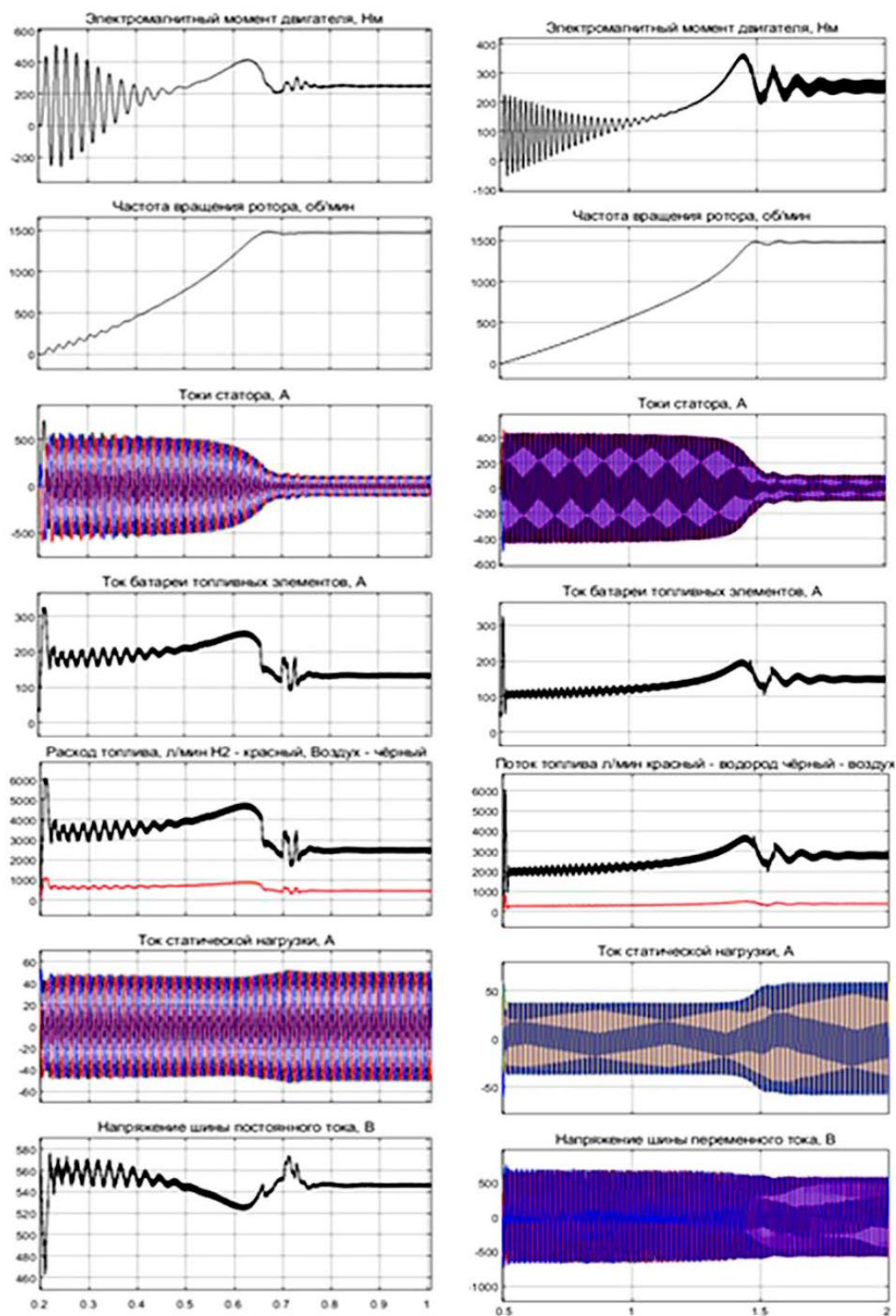


Рис. 3. Переходные процессы в АЭЭС с общей шиной постоянного (а) и переменного (б) тока при прямом пуске асинхронного двигателя и работающей статической нагрузке

Fig. 3. Transient processes in an autonomous electric power system with a DC common bus (a) and AC common bus (b) with direct start of an asynchronous motor and a working static load.

Таблица 3. Результаты моделирования режима прямого пуска асинхронного двигателя с нагрузкой на валу при включенной статической нагрузке**Table 3.** Results of modeling the direct start mode of an asynchronous motor with a load on the shaft and a static load turned on

Показатель	АЭЭС с общей шиной постоянного тока	АЭЭС с общей шиной переменного тока
Суммарные потери мощности в преобразователях в установившемся режиме, кВт	0,115	0,075
Длительность переходного процесса, с	0,8	1,5
Характер переходного процесса	Апериодический	Апериодический
Амплитуда пульсаций тока батареи ВТЭ, А	5	5
Коэффициент пульсаций тока батареи ВТЭ	0,035	0,034
Коэффициент гармоник тока батареи ВТЭ (THD_I), %	9,91	7,98
Коэффициент гармоник напряжения общей шины (THD_U)	4,62	4,59
Провал напряжения общей шины при пуске двигателя, %	4,6	8,3

приведены для второго этапа, когда питание потребителей осуществляется при совместной работе дизель-генератора и батареи ВТЭ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Моделирование переходных и установившихся процессов в АЭЭС показало, что батарея ВТЭ характеризуется достаточно быстрым откликом на изменение нагрузки: при скачкообразных колебаниях мощности потребителей время отклика не превышает нескольких десятых долей секунды. Батарея ВТЭ характеризуется относительно стабильным КПД, который изменяется в диапазоне $\eta = 0,57...0,62$ при изменении мощности потребителей более чем в два раза. В процессе пуска и разбега асинхронного двигателя КПД батареи ВТЭ может кратковременно (на время разбега) уменьшаться до $\eta = 0,50...0,52$. Значения КПД батареи ВТЭ в установившихся режимах представлены в табл. 5.

Переменная составляющая тока батареи ВТЭ представлена высокочастотными гармониками: первая – 10 кГц. Коэффициент гармоник тока батареи ВТЭ мало меняется при изменении величины нагрузки. Относительное значение амплитуд гармоник переменной составляющей

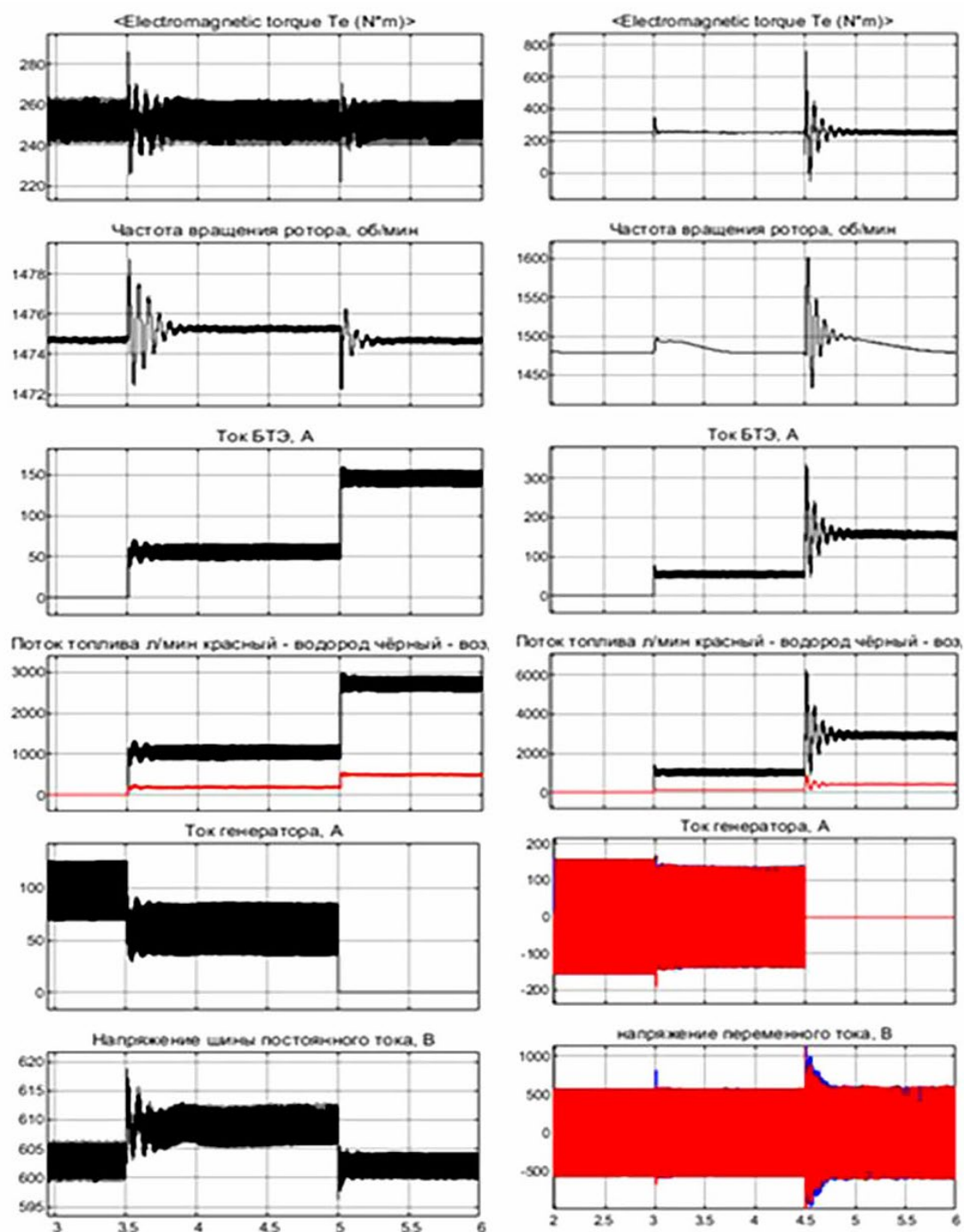


Рис. 4. Переходные процессы в АЭЭС с общей шиной постоянного (а) и переменного (б) тока при переводе питания статической нагрузки и асинхронного двигателя с дизель-генератора на батарею ВТЭ.

Fig. 4. Transient processes in an autonomous electric power system with a DC common bus (a) and AC common bus (b) when transferring power of a static load and an asynchronous motor from a diesel generator to a fuel-cells battery

Таблица 4. Результаты моделирования режима перевода питания статической нагрузки и асинхронного двигателя**Table 4.** Results of modeling the power transfer mode of a static load and an asynchronous motor

Показатель	АЭЭС с общей шиной постоянного тока	АЭЭС с общей шиной переменного тока
Суммарные потери мощности в преобразователях в установившемся режиме, кВт	0,166	0,066
Длительность переходного процесса, с	0,5	0,4
Характер переходного процесса	Колебательный	Колебательный
Средний ток батареи ВТЭ, А	56,26	55,06
Амплитуда пульсаций тока батареи ВТЭ, А	7,5	7,6
Коэффициент пульсаций тока батареи ВТЭ	0,133	0,138
Коэффициент гармоник тока батареи ВТЭ (THD_I), %	13,37	13,13
Напряжение общей шины, В*	608,8	563,4
Коэффициент гармоник напряжения общей шины (THD_U), %	0,37	4,10

тока батареи ВТЭ в процентах от постоянной составляющей тока и коэффициент гармоник для установившихся процессов рассматриваемых режимов работы АЭЭС представлены в табл. 6.

Характер переходных процессов в АЭЭС в рассмотренных режимах удовлетворительный: аperiodический или малоколебательный. Длительность переходных процессов для режимов 1 и 3 не превышает нескольких десятых долей секунды, для режима 2 (прямой пуск асинхронного двигателя) – определяется временем разбега двигателя, по окончании которого все величины стабилизируются в течение 0,5 с.

По количеству полупроводниковых преобразователей и фильтрующих устройств, а также по их суммарной расчетной мощности АЭЭС с общей шиной переменного тока является более предпочтительной для питания заданных потребителей. Наиболее рациональная структура АЭЭС должна быть установлена в каждом конкретном случае, исходя из соотношения мощностей и функционального назначения источников и потребителей энергии. Если основной (наиболее мощный) источник энергии представляет собой источник переменного тока, а вспомогательный источник (менее мощный) – источник постоянного тока, тогда предпочтение следует отдать

Таблица 5. КПД батареи ВТЭ в установившихся режимах.**Table 5.** The efficiency of a fuel-cell battery in a static modes.

Режим	ОШ постоянного тока		ОШ переменного тока	
	Мощность нагрузки ВТЭ, кВт	КПД батареи	Мощность нагрузки ВТЭ, кВт	КПД батареи
1	24	0,62	24	0,62
2	40	0,58	40	0,58
3	64	0,57	64	0,57

Таблица 6. Относительные значения амплитуд гармоник тока батареи ВТЭ (общая шина постоянного/переменного тока)**Table 6.** Relative values of harmonic amplitudes of the fuel-cell battery current (common DC/AC bus)

Режим	Порядок гармоник тока батареи ВТЭ				THDI
	1 (10 кГц)	2 (20 кГц)	3 (30 кГц)	4 (40 кГц)	
1	11,5	5,0	2,75	1,5	13,01
	9,25	4,0	2,0	1,0	10,33
2	4,24	1,67	0,70	0,21	4,62
	4,25	1,59	0,57	0,09	4,59
3	12,5	4,5	1,5	0,25	13,37
	12,25	4,5	1,75	0,1	13,13

АЭЭС с общей шиной переменного тока. Также целесообразной будет структура с общей шиной переменного тока, если основные потребители энергии являются потребителями переменного тока постоянной частоты (например, статические нагрузки и нерегулируемые асинхронные электроприводы). АЭЭС с общей шиной постоянного тока целесообразна в тех случаях, когда батарея ВТЭ является основным источником энергии, а синхронный дизель-генератор выполняет вспомогательные функции, и основными потребителями энергии являются потребители постоянного тока или потребители переменного тока регулируемой частоты (например, асинхронные электроприводы с частотным управлением).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение батарей ВТЭ в качестве вспомогательных или основных источников энергии в составе АЭЭС позволяет обеспечивать электрической

энергией потребители во всех типовых режимах работы, оптимизировать режим нагрузки дизель-генератора, сократить его вредные выбросы в атмосферу и при необходимости выводить дизель-генератор из работы, например, для профилактического осмотра или технического обслуживания.

Батарея ВТЭ как источник энергии характеризуется быстрым откликом на резкое изменение нагрузки и относительно стабильным КПД. Переходные процессы в АЭЭС при использовании БТЭ имеют удовлетворительное качество и быстро затухают. Качество электрической энергии, которой снабжаются потребители, определяется алгоритмами управления полупроводниковыми преобразователями и параметрами фильтрующих устройств в составе энергосистемы.

Оптимальный вариант структуры АЭЭС необходимо устанавливать, исходя из мощности и функционального назначения источников энергии, а также требований по энергообеспечению потребителей. Для энергообеспечения типовых потребителей переменного тока неизменной частоты более предпочтительным вариантом структуры АЭЭС является структура с общей шиной переменного тока, т.к. она требует меньшего количества и меньшей суммарной расчетной мощности полупроводниковых преобразователей энергии.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

1. They have no conflict of interest.
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шнипова А.А. Развитие водородной энергетики в России: новая энергополитика // Энергия единой сети. 2022. № 1 (62). С. 58–69. Дата обращения: 13.12.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_48211448_94382913.pdf EDN: GTVKAB
2. Tezuka K. 20 Years of Railway Technical Research Institute // Japan Railway & Transport Review. 2007. Vol. 47. N. 3. P. 9–15. Дата обращения: 13.12.2023. Режим доступа: https://www.ejrcf.or.jp/jrtr/jrtr47/pdf/f09_Tez.pdf
3. The Fuel Cell Industry Review. ERM International Group Limited, 2021. [internet] Дата обращения: 13.12.2023. Режим доступа: <https://fuelcellindustryreview.com>

4. Klebsch W., Guckes N., Heininger P. Evaluation of climate-neutral alternatives to diesel multiple units. Economic viability assessment based on the example of the Düren network. 2020. [internet] Дата обращения: 13.12.2023. Режим доступа: <https://www.vde.com/resource/blob/2068330/>
5. Ogawa K., Yoneyama T., Sudo T., et al. Performance Improvement of Fuel Cell Hybrid Powered Test Railway Vehicle // Quarterly Report of RTRI. 2021. Vol. 62. N. 1. P. 16–21. doi: 10.2219/rtrirp.62.1_16
6. Касаткин М.А., Ландграф И.К. Перспективы водородных энергоустановок на топливных элементах для развития электротранспорта // Транспорт Российской Федерации. 2019. №6 (85). С. 46–49. Дата обращения: 13.12.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42194760_27245461.pdf EDN: TBTUPX
7. Карасев Д. Водородная и аккумуляторная тяга: проекты ТМХ [internet] Дата обращения: 13.12.2023. Режим доступа: <https://tmholding.ru/media/article/7135.html>
8. Дугин Г.С., Григорьев С.А. Новые возможности использования топливных элементов на транспортных средствах // Транспорт на альтернативном топливе. 2010. № 2 (14). С. 76–78. Дата обращения: 13.12.2023. Режим доступа: <https://ngvrus.ru/file/journal-history/tat-2-2010-preview.pdf> EDN: MBWLIZ
9. Study of Hydrogen Fuel Cell Technology for Rail Propulsion and Review of Relevant Industry Standards. № DOT/FRA/ORD-21/20. Washington: Federal Railroad Administration, 2021. Дата обращения: 13.12.2023. Режим доступа: <https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/2021-06/Study%20of%20Hydrogen%20Fuel%20Cell%20Tech.pdf>
10. Лапидус Б.М. Повышение энергоэффективности и перспективы использования водородных топливных элементов на железнодорожном транспорте // Вестник ВНИИЖТ. 2019. № 5. С. 274–283. doi: 10.21780/2223-9731-2019-78-5-274-283
11. Ким К.К., Ткачук А.А. Трехфазный трансформатор со стабилизирующими свойствами // Электроника и электрооборудование транспорта. 2016. № 5. С. 18–21. Дата обращения: 13.12.2023. Режим доступа: <http://eet-journal.ru/upload/iblock/336/6jlcafwyohyzloe8qniupvrhzuwsa2z9.pdf>
12. Asabin V., Garanin M., Kurmanova L., et al. Prospects for using hydrogen on railway transport // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 953. P. 012074. doi: 10.1088/1757-899X/953/1/012074
13. Байко А.В., Никитин В.В., Середа Е.Г. Водородные источники электроэнергии с инверторами тока в судовых электростанциях переменного тока // Электротехника. 2017. № 6. С. 36–42. doi: 10.3103/S1068371217060037
14. Nikitin V.V., Marikin A.N., Tret'yakov A.V. Generator cars with hybrid power plants // Russian Electrical Engineering. 2016. Vol. 87. N. 5. P. 260–265. doi: 10.3103/S1068371216050138
15. Kim K.K., Panychev A.Yu., Blazhko L.S. Innovative Energy Sources for Hyperloop High-Speed Transport // BRICS Transport. 2022. Vol. 1. N. 1. P. 1–10. doi: 10.46684/2022.1.1

REFERENCES

1. Shnipova AI. Development of hydrogen energy in Russia: a new energy policy. *Energy of Unified Grid*. 2022;62(1):58–69. [cited: 13.12.2023] Available from: <https://энергия-единой-сети.рф/annotatsii-nomerov/1-62-2022/>
2. Tezuka K. 20 Years of Railway Technical Research Institute. *Japan Railway & Transport Review*. 2007;47(3):9–15. [cited: 13.12.2023] Available from: https://www.ejrcf.or.jp/jrtr/jrtr47/pdf/f09_Tez.pdf
3. The Fuel Cell Industry Review, 2021. [internet] [cited 13 Dec. 2023] Available from: <https://fuelcellindustryreview.com>
4. Klebsch W, Guckes N, Heininger P. Evaluation of climate-neutral alternatives to diesel multiple units. Economic viability assessment based on the example of the Düren network. June, 2020. [cited: 13.12.2023] Available from: <https://www.vde.com/resource/blob/2068330/>
5. Ogawa K, Yoneyama T, Sudo T, et al. Performance Improvement of Fuel Cell Hybrid Powered Test Railway Vehicle. *Quarterly Report of RTRI*. 2021;62(1):16–21. doi: 10.2219/rtriqr.62.1_16
6. Kasatkin MA, Landgraf IK. Perspektivy vodorodnyh energoustanovok na toplivnyh elementah dlya razvitiya elektrotransporta. *Transport of Russian Federation*. 2019;6(85):46–49 (In Russ.) [cited: 13.12.2023] Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42194760_27245461.pdf EDN: TBTUPX
7. Karasev D. Vodorodnaya i akkumulyatornaya tyaga: proekty TMH. (In Russ.) [cited: 13.12.2023] Available from: <https://tmholding.ru/media/article/7135.html>
8. Dugin GS, Grigoriev SA. New possibilities for fuel cells application on the transport means. *Alternative Fuel Transport*. 2010;2(14):76–78. [cited: 13.12.2023] Available from: <https://ngvrus.ru/file/journal-history/tat-2-2010-preview.pdf> EDN: MBWLIZ
9. Study of Hydrogen Fuel Cell Technology for Rail Propulsion and Review of Relevant Industry Standards. № DOT/FRA/ORD-21/20. Washington: Federal Railroad Administration, 2021. [cited: 13.12.2023] Available from: <https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/2021-06/Study%20of%20Hydrogen%20Fuel%20Cell%20Tech.pdf>
10. Lapidus BM. Improvements in energy efficiency and the potential use of hydrogen fuel cells in railway transport. *The Russian Railway Science Journal*. 2019;5: 274–283. (In Russ.) doi: 10.21780/2223-9731-2019-78-5-274-283
11. Kim KK, Tkachuk AA. The three-phase transformer with stabilizing properties. *Electronics and electrical equipment of transport*. 2016;5:18–21. (In Russ.) [cited: 13.12.2023] Available from: <http://eet-journal.ru/upload/iblock/336/6jlcafwyohyzloe8qniupvrhzuwsa2z9.pdf>
12. Asabin V, Garanin M, Kurmanova L, et al. Prospects for using hydrogen on railway transport. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020;953:012074. doi: 10.1088/1757-899X/953/1/012074
13. Baiko AV, Nikitin VV, Sereda EG. Hydrogen energy sources with current inverters in ship AC power plants. *Russian Electrical Engineering*. 2017;6(88):355–360. doi: 10.3103/S1068371217060037

14. Nikitin VV, Marikin AN, Tret'yakov AV. Generator cars with hybrid power plants. *Russian Electrical Engineering*. 2016;5(87):260–265. doi: 10.3103/S1068371216050138
15. Kim KK, Panychev AYu, Blazhko LS. Innovative Energy Sources for Hyperloop High-Speed Transport. *BRICS Transport*. 2022;1(1):1–10. doi: 10.46684/2022.1.1

Сведения об авторах:

Карабаджак Иван Дмитриевич, инженер, аспирант;

eLibrary SPIN: 4353-5098;

E-mail: iwan.karabajack@yandex.ru

Никитин Виктор Валерьевич, доктор технических наук, профессор;

eLibrary SPIN: 6864-5678; ORCID: 0000-0002-5699-0424;

E-mail: pgups.emks@mail.ru

Information about the authors:

Ivan D. Karabadzhak, engineer, post-graduate student;

eLibrary SPIN: 4353-5098

E-mail: iwan.karabajack@yandex.ru

Victor V. Nikitin, Dr. Sci (Tech.), Associate Professor;

eLibrary SPIN: 6864-5678; ORCID: 0000-0002-5699-0424;

E-mail: pgups.emks@mail.ru