

ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ОТ БАТАРЕИ ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

И. Д. Карабаджак, В. В. Никитин

Устройства прямого преобразования энергии на основе водородных топливных элементов являются отраслью энергетики, которая интенсивно развивается и может составить конкуренцию традиционным способам получения энергии как в стационарных системах, так и в энергосистемах транспортного исполнения. К достоинствам энергоустановок на основе водородных топливных элементов относится экологическая чистота, относительно высокий коэффициент полезного действия преобразования энергии, бесшумность. Одной из проблем, решение которых необходимо при создании подобных энергосистем, является проблема согласования выходных характеристик батареи топливных элементов с требованиями по уровню и качеству электропитания потребителей. В настоящей работе обосновывается выбор структуры энергетического канала, осуществляющего преобразование рода тока, уровня напряжения и обеспечивающего качество напряжения питания потребителей переменного тока, в автономной электроэнергетической системе, где батарея водородных топливных элементов является единственным источником электрической энергии.

Ключевые слова: автономная электроэнергетическая система, водородные топливные элементы, полупроводниковые преобразователи энергии.

Введение

В настоящее время в сфере стационарной и транспортной энергетики значительное внимание уделяется источникам энергии, которые представляют собой альтернативу традиционному углеводородному сырью, в частности источникам электрической энергии на основе водородных топливных элементов [1 – 4]. Преимуществами таких источников электроэнергии являются отсутствие вредных выбросов в атмосферу, сравнительно высокий коэффициент полезного действия преобразования энергии, который может достигать 50 – 60 %, бесшумность [5].

Статистические исследования свидетельствуют о быстром росте количества энергоустановок транспортного исполнения с использованием водородных топливных элементов. За период 2018 – 2022 гг. количество таких энергоустановок увеличилось втрое (с 10 до 30 тысяч), в то время как количество энергоустановок стационарного исполнения осталось примерно на том же уровне (около 50 тысяч). За тот же период времени суммарная мощность энергоустановок транспортного исполнения выросла с 600 до 2000 МВт [6]. В энергосистемах стационарных объектов используется широкая номенклатура водородных топливных элементов: на основе протоннообменных мембран (PEMFC), твердых оксидов (SOFC), фосфорнокислых электролитов (PAFC), щелочных электролитов (AFC), расплавленных карбонатных электролитов (MCFC). Единичная мощность стационарных водородных энергоустановок в настоящее время достигает 2 МВт. В энергоустановках транспортных объектов применяются в основном водородные топливные элементы на основе протоннообменных мембран (PEMFC), единичная мощность установок достигает 300 кВт [5, 6].

В то же время внедрение энергоустановок на основе водородных топливных элементов требует решения ряда проблем: развитие инфраструктуры по производству и хранению водорода, обеспечение безопасности энергоустановок, обеспечение сочетания выходных характеристик батареи водородных топливных элементов с требованиями по электропитанию потребителей энергии. Последняя из перечисленных проблем предполагает выбор и обоснование структуры энергетического канала, который включает в себя промежуточные преобразователи и фильтрующие элементы, обеспечивающие энергоснабжение потребителей с требуемым уровнем и качеством напряжения питания.

Постановка задачи исследования

В настоящей статье рассматривается задача обоснования структуры системы энергообеспечения потребителей переменного тока от батареи водородных топливных элементов (БТЭ) в автономной электроэнергетической системе при условии, что мощности источника и приемника энергии соизмеримы. Задача сводится к тому, чтобы рассмотреть возможные варианты структуры системы энергообеспечения и выбрать оптимальную структуру по следующим критериям:

1) минимальные суммарные потери мощности во всех промежуточных преобразователях и элементах системы;

2) минимальное искажение формы напряжения потребителя, которое оценивается коэффициентом гармонических составляющих напряжения нагрузки $THD(U)$;

3) минимальное воздействие пульсаций тока БТЭ на ее работу, которое оценивается коэффициентом пульсаций и коэффициентом искажения тока БТЭ $THD(I)$.

Рассматривается автономная электроэнергетическая система, в которой БТЭ является единственным источником энергии и имеет номинальную мощность $P_{\text{БТЭ.н}} = 100$ кВт. Потребитель энергии является статической нагрузкой с номинальной мощностью $S_{\text{Н}} = 100$ кВА при $\cos\varphi = 0,8$ активно-индуктивного характера. Полупроводниковые преобразователи в составе энергетического канала приводят к появлению пульсаций тока БТЭ, что негативно сказывается на ее эффективности и долговечности [7, 8], и искажают форму напряжения питания потребителя.

Для напряжения и тока БТЭ гармонический состав кривых и коэффициент нелинейных искажений определяется относительно постоянной составляющей; для напряжения нагрузки – относительно номинальной частоты $f_{\text{Н}} = 50$ Гц. Кроме этого, оценивается время переходного процесса при подключении статической нагрузки к БТЭ, критерием оценки принято время нарастания тока нагрузки от нуля до установившегося значения.

Рассматриваются три варианта системы энергообеспечения потребителя переменного тока от водородного источника электроэнергии, которые представлены на рис. 1. В дальнейшем для краткости они именуются: вариант 1 (рис. 1, а), вариант 2 (рис. 1, б) и вариант 3 (рис. 1, в). Параметры основных элементов системы приведены в табл. 1.

Параметры выходных фильтров переменного тока подобраны таким образом, чтобы обеспечить коэффициент гармонических искажений напряже-

ния нагрузки $THD(U) = 5 \pm 0,05\%$. Индуктивность в звене постоянного тока в первом и третьем варианте схемы подобрана так, чтобы обеспечить коэффициент гармонических искажений кривой тока БТЭ $THD(I) = 5 \pm 0,05\%$.

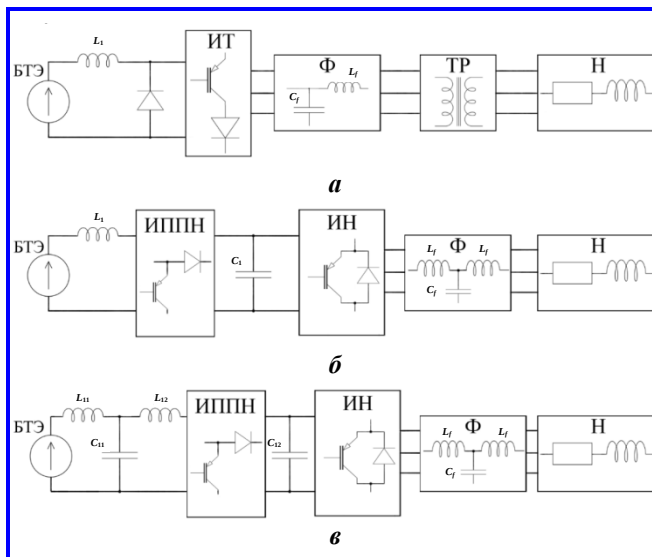


Рис. 1. Структуры системы энергообеспечения потребителя переменного тока от БТЭ: а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3; ИТ – инвертор тока; ИН – инвертор напряжения; ИППН – импульсный преобразователь постоянного напряжения; Ф – фильтр; ТР – трехфазный трансформатор; Н – статическая нагрузка

Таблица 1

Параметры основных элементов в рассматриваемых вариантах систем энергообеспечения

Элементы систем энергообеспечения	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
БТЭ	Мощность номинальная $P_{\text{БТЭ.н}} = 100$ кВт Напряжение номинальное $U_{\text{БТЭ.н}} = 390$ В Напряжение холостого хода $U_{\text{БТЭ.х}} = 520$ В Номинальный ток $I_{\text{БТЭ.н}} = 252$ А		
Нагрузка	Мощность $S_{\text{Н}} = 100$ кВА Коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,8$ Частота $f_{\text{Н}} = 50$ Гц		
Инвертор	Частота коммутации ключей $f_c = 2$ кГц		
Реактивные элементы в звене постоянного тока	$L_1 = 23$ мГн	$L_1 = 0,6$ мГн $C_1 = 2000$ мкФ	$L_{11} = 1$ мкГн $L_{12} = 0,6$ мГн $C_{11} = 500$ мкФ $C_{12} = 2000$ мкФ
Фильтры переменного тока	Схема C-L $C_f = 1500$ мкФ $L_f = 3000$ мкГн	Схема L-C-L $L_f = 650$ мкГн $C_f = 100$ мкФ	Схема L-C-L $L_f = 650$ мкГн $C_f = 100$ мкФ

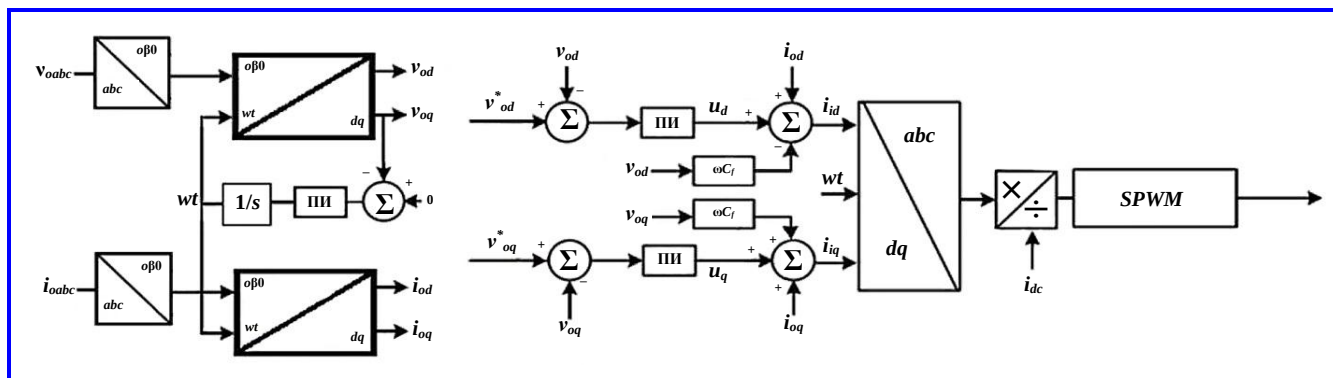


Рис. 2. Структурно-функциональная схема системы управления инверторами

Система управления инвертором основана на использовании ПИ-регулирования в системе отсчета dq . Величины трехфазного переменного тока и напряжения преобразуются в компоненты постоянного тока в системе отсчета dq для устранения установившейся ошибки. Метод модуляции, используемый для генерации управляющих импульсов, представляет собой синусоидальную широтно-импульсную модуляцию [9, 10]. Структурно-функциональная схема системы управления инверторами представлена на рис. 2.

Результаты исследования

Результаты оценки суммарных потерь мощности в преобразователях системы энергообеспечения, длительности переходного процесса при подключении нагрузки к БТЭ, а также исследования формы кривых тока и напряжения БТЭ и напряжения нагрузки представлены в табл. 2. Гармонический состав кривых напряжения и тока БТЭ, а также напряжения нагрузки для трех вариантов системы представлен на рис. 3.

Анализ гармонического состава кривых напряжений и тока показывает, что в схеме с инвертором тока преобладают низкочастотные пульсации напряжения и тока БТЭ, а в схемах с инвертором напряжения – высокочастотные. Влияние пульсаций тока на долговечность топливных элементов на данный момент изучено недостаточно глубоко, однако анализ имеющихся публикаций [7, 8, 11, 12] позволяет сделать однозначный вывод о том, что на водородные топливные элементы большее отрицательное влияние оказывают именно низкочастотные пульсации тока, которые наиболее выражены в варианте 1 рассматриваемой системы энергообеспечения.

Суммарные потери мощности в преобразователях системы, указанные в табл. 2, включают в себя: потери в полупроводниковых приборах инвертора (в открытом состоянии и коммутационные); потери

в полупроводниковых приборах ИППН (в открытом состоянии и коммутационные); потери в трансформаторе [10, 13]. Составляющие потерь мощности для рассматриваемых вариантов системы энергообеспечения представлены в табл. 3.

Таблица 2

Результаты оценки потерь мощности, длительности переходного процесса и качества напряжения и тока батареи водородных топливных элементов и нагрузки

Показатель	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Суммарные потери мощности, Вт	4256,7	929,1	929,1
Длительность переходного процесса, с	0,11	0,020	0,024
Постоянная составляющая:			
– напряжения БТЭ, В;	408,9	410,5	411,9
– тока БТЭ, А	198,0	193,7	189,7
Коэффициенты нелинейных искажений:			
– напряжения БТЭ $THD(U)$, %;	0,84	2,34	0,83
– тока БТЭ $THD(I)$, %;	4,95	13,97	5,05
– напряжения фазы нагрузки $THD(U)$, %	4,95	5,05	4,98
Коэффициент пульсаций:			
– напряжения БТЭ, %;	2,18	5,43	1,55
– тока БТЭ, %	12,68	33,92	9,59

Таблица 3

Составляющие потерь мощности в преобразователях для рассматриваемых вариантов системы энергообеспечения

Показатель	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Потери в инверторе, Вт	2001,2	828,5	828,5
Потери в импульсном преобразователе, Вт	–	100,6	100,6
Потери в трансформаторе, Вт	2255,5	–	–
Суммарные потери мощности, Вт	4256,7	929,1	929,1

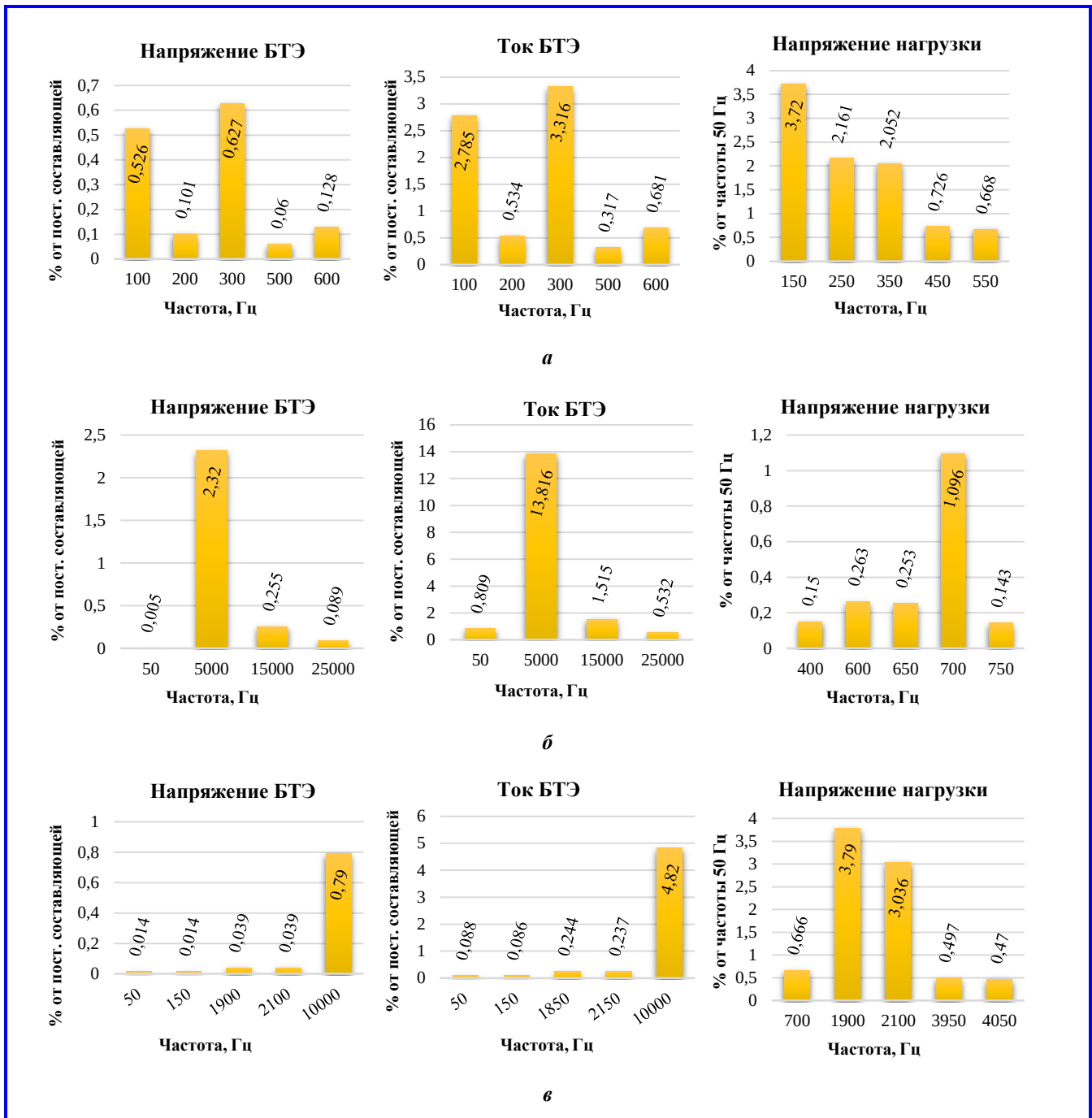


Рис. 3. Гармонический состав напряжения и тока батареи водородных топливных элементов и напряжения нагрузки для вариантов: а – 1; б – 2; в – 3

По результатам моделирования стационарного режима можно сделать вывод, что наибольшие потери мощности имеют место в преобразователях системы, построенной по варианту 1, причем более половины суммарных потерь составляют потери мощности в трансформаторе. Потери мощности в инверторе тока (вариант 1) более чем в 2 раза превышают потери мощности в инверторах напряжения (варианты 2, 3).

Напрямую определить потери мощности в дроселях и индуктивностях фильтров рассматриваемых систем энергообеспечения на данном этапе анализа затруднительно, однако можно использовать косвенную оценку потерь мощности и массогабаритных параметров по запасаемой энергии индуктивных элементов. Результаты такой оценки представлены в табл. 4. Из таблицы видно, что

энергия, запасаемая в индуктивных элементах системы по варианту 1, на порядок больше.

Интерес представляет также распределение составляющих потерь мощности в полупроводниковых преобразователях в зависимости от частоты коммутации. Частота коммутации ключевых элементов преобразователей оказывает основное влияние на потери для обоих типов инверторов. Результаты моделирования составляющих потерь мощности в инверторах напряжения и тока представлены в табл. 5, 6. В табл. 5, 6 приняты следующие обозначения: $p_{п.д}$ – потери проводимости в диодах; $p_{п.д0}$ – потери проводимости в обратном диоде; $p_{п.тр}$ – потери проводимости в транзисторах; $p_{к.тр}$ – коммутационные потери в транзисторах; $p_{инв}$ – суммарные потери мощности в инверторе.

Коммутационные потери в инверторе напряжения более высокие, чем в инверторе тока, однако потери проводимости больше в инверторе тока,

Таблица 4

Энергия, запасаемая во входных дросселях полупроводниковых преобразователей и индуктивностях выходных фильтров инверторов

Вариант схемы системы энергообеспечения	Входной дроссель инвертора тока, Дж	Входной дроссель ИППН, Дж	Дроссели выходного фильтра инвертора, Дж
Вариант 1	450,85	–	31,5
Варианты 2, 3	–	11,3	13,1

Таблица 5

Потери мощности в зависимости от частоты коммутации для инвертора напряжения

Потери мощности, Вт	Частота коммутации f_c , кГц									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$p_{п.д}$	28,3	28,3	28,5	28,5	28,3	28,2	28,2	28,3	28,4	28,2
$p_{п.д0}$	97,0	96,7	96,5	96,4	96,5	96,6	96,5	96,7	96,5	97,1
$p_{п.тр}$	12,7	25,4	38,1	50,7	63,4	76,3	88,8	101,7	114,2	127,3
$p_{инв}$	828,5	902,3	978,4	1054,5	1129,2	1207,0	1281,4	1359,8	1434,6	1515,5

Таблица 6

Потери мощности в зависимости от частоты коммутации для инвертора тока

Потери мощности, Вт	Частота коммутации f_c , кГц									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$p_{п.д}$	160,7	167,9	165,6	164,5	166,5	165,6	165,0	166,1	165,9	164,9
$p_{п.д0}$	20,7	19,3	19,9	19,3	19,2	19,2	19,2	19,8	19,2	19,7
$p_{п.тр}$	159,7	166,7	164,6	163,5	165,5	164,5	164,0	165,5	164,4	163,9
$p_{к.тр}$	9,7	20,2	29,9	39,6	50,1	59,8	69,5	79,9	89,7	99,3
$p_{инв}$	2001,2	2149,4	2179,6	2225,3	2331,8	2358,4	2410,2	2486,4	2529,5	2588,4

что обусловлено последовательным соединением транзисторов и диодов и большими величинами коммутируемых токов; в результате суммарные потери мощности в полупроводниковых приборах инвертора тока оказываются в 1,7 – 2,4 раза выше во всем диапазоне частот коммутации.

Заключение

Все рассмотренные варианты построения автономной электроэнергетической системы обеспечивают питание потребителя переменного тока от батареи водородных топливных элементов с помощью промежуточных преобразователей и обеспечивают требуемое качество электропитания: коэффициент гармонических искажений напряжения нагрузки не превышает $THD(U) = 5 \pm 0,05\%$.

Меньшие суммарные потери мощности в преобразователях энергосистемы обеспечивают варианты структуры с импульсным преобразователем постоянного напряжения и инвертором напряжения (варианты 2, 3). Эти варианты структуры характеризуются также существенно меньшими массогабаритными параметрами дросселей и индуктивностей выходных фильтров переменного тока.

По степени влияния пульсаций тока, потребляемого от БТЭ, варианты с импульсным преобразователем постоянного напряжения и инвертором напряжения также предпочтительны, поскольку в кривой тока батареи преобладают высокочастотные пульсации, вредное влияние которых на долговечность батареи меньше, чем низкочастотных пульсаций тока, которые преобладают в схеме с инвертором тока. Кроме того, вариант 3 обеспечивает минимальный коэффициент пульсаций тока БТЭ.

Системы, построенные и использованием импульсных повышающих преобразователей и инверторов напряжения также обеспечивают меньшую длительность переходного процесса при подключении потребителя к батарее водородных топливных элементов.

Литература

1. Развитие водородной энергетики в России: новая энергополитика // Энергия единой сети. – 2022. – № 1 (62). – С. 58–69.
2. Касаткин, М. А. Перспективы водородных энергоустановок на топливных элементах для развития электротранспорта / М. А. Касаткин, И. К. Ландграф // Транспорт Российской Федерации. – 2019. – № 6 (85). – С. 46–49.
3. Богославский, А. Е. Водородное топливо. Перспективы применения на подвижном составе / А. Е. Богославский // Транспорт Российской Федерации. – 2019. – № 6 (85). – С. 40–45.

4. Козлов, С. И. Топливные элементы – перспективные химические источники электрической энергии / С. И. Козлов, В. Н. Фатеев // Транспорт на альтернативном топливе. – 2014. – № 2. – С. 9–22.
5. Дугин, Г. С. Новые возможности использования топливных элементов на транспортных средствах / Г. С. Дугин, С. А. Григорьев // Транспорт на альтернативном топливе. – 2010. – № 2 (14). – С. 76–78.
6. The Fuel Cell Industry Review 2022 // The ERM International Group Limited 2000 : [website]. – 2024. – URL : <https://www.erm.com>.
7. Кукконен, С. Силовая электроника в гибридном приводе с топливными элементами. Часть 4 / С. Кукконен // Силовая электроника. – 2015. – № 6. – С. 70–76.
8. Jih-Sheng, Lai Energy Management Power Converters in Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles / Lai Jih-Sheng, D. J. Nelson. – DOI : 10.1109/JPROC.2006.890122 // Proceedings of the IEEE. – 2007. – Vol. 95. – No. 4. – P. 766–777.
9. Syahrul, Azmi Voltage-controlled of a three-phase current source inverter in islanded operation / Azmi Syahrul, Adam Grain, Abdul Rahim Siti Rafidah. – DOI : 10.11591/ijeecs.v16.i1 // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2019. – Vol. 16. – No. 1. – P. 156–164.
10. Comparative analysis between voltage and current source inverters in grid-connected application / Syahrul Azmi, K. H. Ahmed, S. J. Finney [et al.]. – DOI : 10.1049/cp.2011.0138 // IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011). – 2011. – P. 101–101.
11. Impedance-based diagnosis of polymer electrolyte membrane fuel cell failures associated with a low frequency ripple current / Kim Jonghoon, Lee Inhae, Tak Yongsug [et al.] // Renewable Energy. – 2013. – No 51. – P. 302–309.
12. Wahdame, B. Impact of power converter current ripple on the durability of a fuel cell stack / Bouchra Wahdame, Laurent Girardot, Daniel Hissel [et al.]. – DOI : 10.1109/ISIE.2008.4677206 // 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, UK. – 2008. – P. 1495–1500.
13. Datasheet Infineon Technologies AG FF300R06KE3_B2 // Infineon Technologies AG : [website]. – 1999 – 2025. – 8 p. – URL : <https://www.infineon.com>.

Поступила в редакцию 28.01.2025

Иван Дмитриевич Карабаджак, ассистент кафедры «Электротехника и теплоэнергетика»,
e-mail: iwan.karabadjack@yandex.ru.

Виктор Валерьевич Никитин, доктор технических наук, доцент, профессор, e-mail: pgups.emks@mail.ru.
(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)).

POWER SUPPLY FOR AC CONSUMERS FROM A HYDROGEN FUEL CELL BATTERY

I. D. Karabadzhak, V. V. Nikitin

Direct energy conversion devices based on hydrogen fuel cells are a branch of energy that is developing rapidly and can compete with traditional methods of energy generation both in stationary systems and in transport energy systems. The advantages of power plants based on hydrogen fuel cells include environmental friendliness, relatively high efficiency of energy conversion, and noiselessness. One of the problems that must be solved when creating such energy systems is the problem of matching the output characteristics of a fuel cell battery with the requirements for the level and quality of consumer power supply. This paper substantiates the choice of the structure of the energy channel that converts the type of current, voltage level, and ensures the quality of the supply voltage of alternating current consumers in an autonomous electric power system where a hydrogen fuel cell battery is the only source of electrical energy.

Key words: autonomous electric power system, hydrogen fuel cells, semiconductor energy converters.

References

1. Development of hydrogen energetics in Russia : new energy politics // Energy of Unified Grid. – 2022 – No. 1 (62). – P. 58–69.
2. Kasatkin, M. A. Prospects of the hydrogen energy installations based on fuel cells for development of electric transport / M. A. Kasatkin, I. K. Landgraf // Transport of the Russian Federation. – 2019. – No. 6 (85). – P. 46–49.
3. Bogoslavkiy, A. E. Hydrogen fuel. Prospects of use for rolling stock / A. E. Bogoslavkiy // Transport of the Russian Federation. – 2019. – No. 6 (85) – P. 40–45.
4. Kozlov, S. I. Fuel cells – prospective chemical sources of electrical energy / S. I. Kozlov, V. N. Fateev // Alternative Fuel Transport. – 2014. – No. 2. – P. 9–22.
5. Dugin G. S. New opportunities of use of fuel cells for transport / G. S. Dugin, S. A. Grigoriev // Alternative Fuel Transport. – 2010. – No. 2(14). – P. 76–78.
6. The Fuel Cell Industry Review 2022 // The ERM International Group Limited 2000 : [website]. – 2024. – URL : <https://www.erm.com>.

7. Kukkonen, S. Power electronics in hybrid drive with fuel cells. Part 4 / S. Kukkonen // Power Electronics. – 2015. – No. 6. – P. 70–76.
8. Jih-Sheng, Lai Energy Management Power Converters in Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles / Lai Jih-Sheng, D. J. Nelson. – DOI : 10.1109/JPROC.2006.890122 // Proceedings of the IEEE. – 2007. – Vol. 95. – No. 4. – P. 766–777.
9. Syahrul, Azmi Voltage-controlled of a three-phase current source inverter in islanded operation / Azmi Syahrul, Adam Grain, Abdul Rahim Siti Rafidah. – DOI : 10.11591/ijeecs.v16.i1 // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2019. – Vol. 16. – No. 1. – P. 156–164.
10. Comparative analysis between voltage and current source inverters in grid-connected application / Syahrul Azmi, K. H. Ahmed, S. J. Finney [et al.]. – DOI : 10.1049/cp.2011.0138 // IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011). – 2011. – P. 101–101.
11. Impedance-based diagnosis of polymer electrolyte membrane fuel cell failures associated with a low frequency ripple current / Kim Jonghoon, Lee Inhae, Tak Yongsug [et al.] // Renewable Energy. – 2013. – No 51. – P. 302–309.
12. Wahdame, B. Impact of power converter current ripple on the durability of a fuel cell stack / Bouchra Wahdame, Laurent Girardot, Daniel Hissel [et al.]. – DOI : 10.1109/ISIE.2008.4677206 // 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, UK. – 2008. – P. 1495–1500.
13. Datasheet Infineon Technologies AG FF300R06KE3_B2 // Infineon Technologies AG : [website]. – 1999 – 2025. – 8 p. – URL : <https://www.infineon.com>.

Ivan Dmitrievich Karabadzhak, assistant of Heat Power Engineering department, e-mail: iwan.karabajack@yandex.ru.

Victor Valer'evich Nikitin, doctor of technical sciences, associate professor, professor,
e-mail: pgups.emks@mail.ru.

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