

УДК 621.352.6

DOI 10.46960/2658-6754_2022_4_53

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОМТЭ В УСТАНОВИВШИХСЯ И ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

А.Б. Лоскутов

ORCID: 0000-0003-1961-1728 e-mail: loskutovab@mail.ru

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

И.А. Липужин

ORCID: 0000-0002-3799-5641 e-mail: lipuzhin@nntu.ru

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

Р.Ш. Бедретдинов

ORCID: 0000-0003-0767-1096 e-mail: bedretdinov@nntu.ru

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

Исследована проблема интеграции топливных элементов с полимерной протонобменной мембраной (ПОМТЭ) в системы электроснабжения стационарных потребителей. Разработан экспериментальный образец гибридного энергетического комплекса на основе ПОМТЭ и литий-железо-фосфатных аккумуляторных батарей для питания стационарных потребителей железнодорожной отрасли. Проведены экспериментальные исследования работы ПОМТЭ в установившихся и динамических режимах. Для установившихся режимов работы ПОМТЭ представлен анализ зависимостей среднего расхода водорода за 1 мин, объема водорода на выработку 1 кВтч электроэнергии, КПД ПОМТЭ от тока нагрузки. Представлены диаграммы изменения выходного напряжения ПОМТЭ и выполнен анализ их характеристик при работе ПОМТЭ при динамическом изменении нагрузки.

Ключевые слова: водород, гибридный энергетический комплекс, КПД, система управления, топливный элемент, топливный элемент с полимерной протонобменной мембраной.

Для цитирования: Лоскутов А.Б., Липужин И.А., Бедретдинов Р.Ш. Исследование характеристик ПОМТЭ при работе в установившихся и динамических режимах // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 4. С. 53-77.

DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_53

STUDY OF PEMFC CHARACTERISTICS IN STEADY AND DYNAMIC MODES

A.B. Loskutov

ORCID: **0000-0003-1961-1728** e-mail: **loskutovab@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

I.A. Lipuzhin

ORCID: **0000-0002-3799-5641** e-mail: **lipuzhin@nntu.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

R.Sh. Bedretdinov

ORCID: **0000-0003-0767-1096** e-mail: **bedretdinov@nntu.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article is devoted to the problem of proton-exchange membrane fuel cells (PEMFC) integration into the power supply systems of stationary consumers. A prototype of a hybrid energy complex based on PEMFC and lithium-iron-phosphate batteries to power stationary consumers in the railway industry has been developed. Experimental studies of the PEMFC operation in steady and dynamic modes have been carried out. The dependences of the average hydrogen consumption for 1 min, the volume of hydrogen for the generation of 1 kWh of electricity and efficiency of PEMFC on the load current are presented for the steady-state operating modes. Diagrams of the change in PEMFC output voltage are presented and an analysis of their characteristics during the operation of the PEMFC under dynamic change of load have carried out.

Keywords: control system, efficiency, hydrogen, hybrid energy complex, fuel cell, proton-exchange membrane fuel cells.

For citation: A.B. Loskutov, I.A. Lipuzhin and R.Sh. Bedretdinov, “Study of of PEMFC characteristics in steady and dynamic modes”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 53-77, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_53

I. Введение

Ключевое направление развития мировой электроэнергетики связано с расширением использования экологических низкоуглеродных источников энергии. В связи с этим все большее внимание уделяется топливным элементам. По сравнению с другими типами низкоуглеродных источников (ветровые энергоустановки, фотоэлектрические модули и др.) главными преимуществами топливных элементов являются: высокий КПД (от 40 до

60 %); отсутствие шума и вибрации в процессе работы, модульность конструкции. Это определяет перспективы их широкого применения на транспорте и в системах электроснабжения потребителей [1, 2].

В настоящее время наиболее распространенными типами топливных элементов являются: топливные элементы с полимерной протонообменной мембраной (ПОМТЭ), топливные элементы с щелочным электролитом (ЩТЭ), топливные элементы с фосфорнокислотным электролитом (ФКТЭ), топливные элементы с расплавленным карбонатом (РКТЭ), топливные элементы с твердооксидным электролитом (ТОТЭ) [3]. Выбор типа ТЭ зависит от особенностей его работы, параметров и требований потребителя. Для электроснабжения стационарных потребителей установленной мощностью до 50 кВт наиболее подходящими считаются ПОМТЭ. ПОМТЭ могут работать с высокой эффективностью при низкой температуре, а также отличаются компактными размерами.

Однако проблема интеграции ПОМТЭ в системы электроснабжения связана с недостаточной маневренностью топливного элемента. Работа топливных элементов при резких увеличениях нагрузки характеризуется топливным голоданием [4]. Решение данной проблемы связано с комплексным использованием ПОМТЭ с системами накопления на основе аккумуляторных батарей (АБ) в едином гибридном энергетическом комплексе (ГЭК). АБ обеспечивает более быстрый отклик на динамическое изменение нагрузки по сравнению с ПОМТЭ [5, 6].

В НГТУ выполнен проект по разработке экспериментального образца ГЭК на основе ПОМТЭ и литий-железо-фосфатных АБ для питания стационарных потребителей железнодорожной отрасли [3]. Установленная мощность ПОМТЭ составляет 1 кВт, выходное номинальное напряжение 57 В. Выходные параметры ПОМТЭ и АБ согласуются между собой и потребителям электроэнергии с помощью устройства контроля, защиты и управления (УКЗУ). Для определения параметров силовой части УКЗУ и разработки системы управления необходимо понимание зависимостей характеристик ПОМТЭ (расход водорода, КПД) от входных параметров (давление водорода) и нагрузки в установившихся режимах работы и возможностей ПОМТЭ реагировать на динамические изменения нагрузки.

Исследованиям характеристик топливных элементов посвящено большое количество научных статей. Основным методом исследования является имитационное моделирование. Так, моделирование работы топливных элементов при изменении подачи водорода и кислорода представлено в [7, 8]. В [9] с помощью моделирования проведен анализ зависимости между выходной мощностью ПОМТЭ и его эффективностью. Эффективность работы ПОМТЭ на основе моделирования в *LabView* исследуется в

[10]. Большинство имитационных моделей показывают хорошие результаты при медленном изменении нагрузки. Однако качественные зависимости характеристик ПОМТЭ от входных параметров, полученные с помощью имитационного моделирования, могут отличаться. Так, в [7] показано, что напряжение топливного элемента уменьшается при увеличении давления кислорода и температуры. В [12] характер данных зависимостей является противоположным.

Имитационная модель, отражающая переходные процессы при работе топливного элемента при резких изменениях нагрузки, а также обзор исследований в данной области представлены в [13]. Однако возможность конкретного ПОМТЭ реагировать на динамические изменения нагрузки также зависит от степени деградации топливного элемента и потребления мощности устройством (вентиляторы или компрессор) для подачи воздуха, что сложно учесть при имитационном моделировании.

Таким образом, для перехода к стадии создания экспериментального образца ГЭК обязательным является дополнение результатов имитационного моделирования, подтверждающих правильность основных принятых решений, результатами экспериментальных исследований, позволяющих скорректировать параметры силовой части ГЭК и более точно настроить систему управления.

Статья является продолжением работы [3] и вносит научный вклад в решение проблемы интеграции ПОМТЭ в системы электроснабжения за счет комплексного анализа характеристик работы ПОМТЭ, полученных на основе экспериментальных исследований. С практической стороны полученные в работе результаты предназначены для корректировки системы управления экспериментального образца ГЭК, обеспечивающей эффективную работу ГЭК в установившихся режимах и надежное питание нагрузки при ее динамических изменениях.

II. Материалы и методы

Ячейка ПОМТЭ состоит из двух электродов (анода и катода), которые разделены мембраной (рис. 1). На аноде происходит реакция окисления водорода, вследствие которой атомы водорода делятся на протоны и электроны, стремящиеся к катоду:



Движение протонов к катоду осуществляется через мембрану. Перенос электронов к катоду осуществляется по внешней цепи, таким образом, создается постоянный электрический ток. На катоде происходит восстановительная реакция, в результате которой протоны и электроны соединяются

с окислителем (кислородом или воздухом) с образованием воды и выделением тепла:



В результате протекающих реакций на выводах электродов топливного элемента образуется напряжение $U_{\text{ПОМТЭ}}$.

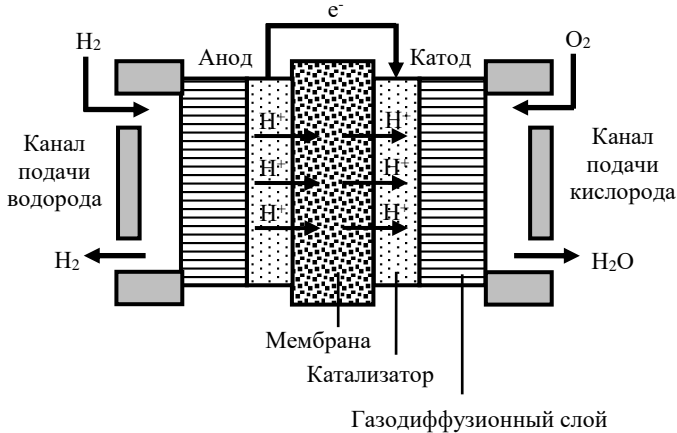


Рис. 1. Структура ячейки ПОМТЭ

Fig. 1. PEMFC cell structure

Зависимость $U_{\text{ПОМТЭ}}$ от тока нагрузки $I_{\text{ПОМТЭ}}$ отражает вольт-амперная характеристика (ВАХ) топливного элемента. На рис. 2 приведена паспортная ВАХ ПОМТЭ, используемого в ГЭК. На ВАХ можно выделить 3 области потерь в топливном элементе [4, 9, 11, 14]:

- область I – активационные потери ($I_{\text{ПОМТЭ}}$ = от 0 до 3 А);
- область II – омические потери ($I_{\text{ПОМТЭ}}$ = от 3 до 17 А);
- область III – концентрационные потери ($I_{\text{ПОМТЭ}}$ более 17 А).

Значение $U_{\text{ПОМТЭ}}$ меньше теоретически возможного напряжения на величину потерь напряжения в топливном элементе:

$$U_{\text{ПОМТЭ}} = E_{\text{ТЕОР}} - \Delta U_{\text{АКТ}} - \Delta U_{\text{ОМ}} - \Delta U_{\text{КОН}}, \quad (3)$$

где $E_{\text{ТЕОР}}$ – теоретическая величина ЭДС топливного элемента (напряжение на выводах топливного элемента при разомкнутой электрической сети);

$\Delta U_{\text{АКТ}}$ – активационные потери топливного элемента, связанные с медленными реакциями на поверхности электродов (область I); $\Delta U_{\text{ОМ}}$ – омические потери топливного элемента, связанные с падением напряжения из-за резистивных потерь в ячейке ПОМТЭ (область II); $\Delta U_{\text{КОН}}$ – концентрационные потери топливного элемента, связанные со снижением плотности реагентов при больших токах (область III).

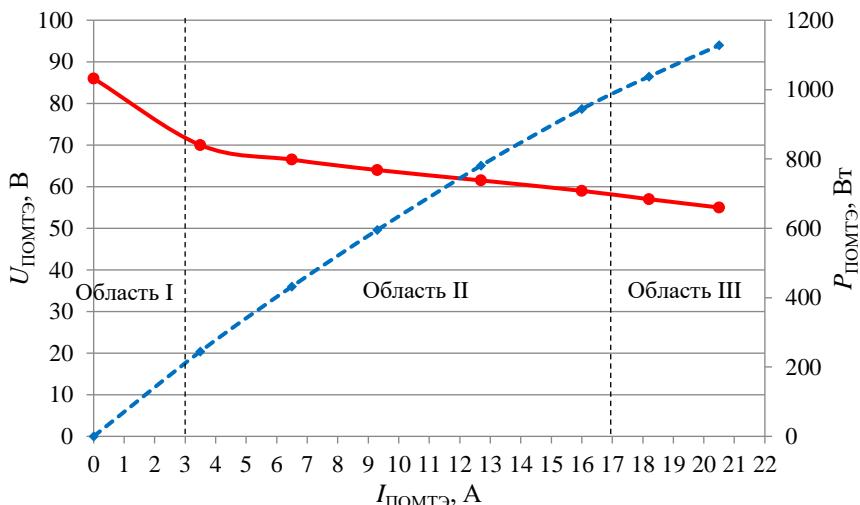


Рис. 2. Паспортная ВАХ ПОМТЭ

Fig. 2. PEMFC passport volt-ampere characteristic

Потери напряжения непосредственно влияют на эффективность работы ПОМТЭ и ГЭК в целом. Чем выше значение $U_{\text{ПОМТЭ}}$ при соответствующем токе нагрузки, тем меньше потери напряжения в топливном элементе и работа ПОМТЭ более эффективна. Предполагается, что ПОМТЭ в составе ГЭК большую часть времени будет работать в области омических потерь. Омические потери пропорциональны сопротивлению ячейки ПОМТЭ, которое включает сопротивление протонному току в мембране и сопротивление электродов движению электронов [12]:

$$\Delta U_{\text{ОМ}} = I_{\text{ПОМТЭ}} \cdot R_{\text{ПОМТЭ}} = I_{\text{ПОМТЭ}} \cdot (R_{\text{М}} + R_{\text{Эл}}), \quad (4)$$

где $R_{\text{ПОМТЭ}}$ – сопротивление ячейки ПОМТЭ; $R_{\text{Эл}}$ – сопротивление электродов топливного элемента движению электронов ($R_{\text{Эл}} = \text{const}$); $R_{\text{М}}$ – сопротивление мембраны топливного элемента движению ионов.

От величины $R_{\text{ПОМТЭ}}$ зависят параметры элементов УКЗУ в составе ГЭК [3].

*Методика исследования работы ПОМТЭ
в установившемся режиме*

В качестве основных характеристик работы ПОМТЭ в установившихся режимах в работе использованы:

- 1) $\eta_{\text{ПОМТЭ}}$ – КПД ПОМТЭ по производству электроэнергии, %;
- 2) $W_{\text{ПОМТЭ}}$ – выработанная электроэнергия ПОМТЭ, кВтч;
- 3) V – объем использованного водорода ПОМТЭ, л.

КПД по производству электроэнергии ($\eta_{\text{ПОМТЭ}}$) является одной из основных характеристик, определяющих эффективность работы ПОМТЭ в установившемся режиме. Под $\eta_{\text{ПОМТЭ}}$ понимается отношение электроэнергии, выработанной топливным элементом, к энергии, которая была запасена в использованном топливном элементе водороде:

$$\eta_{\text{ПОМТЭ}} = W_{\text{ПОМТЭ}} / Q, \quad (5)$$

где Q – энергия, которая была запасена в поступившем на вход топливного элемента водороде, кДж.

Значение $W_{\text{ПОМТЭ}}$ можно выразить в кДж ($1 \text{ кВтч} = 3,6 \text{ кДж}$), используя выражение:

$$W_{\text{ПОМТЭ}} = (U_{\text{ПОМТЭ}} \cdot I_{\text{ПОМТЭ}} \cdot \Delta t \cdot 3,6) / 60, \quad (6)$$

где $P_{\text{ПОМТЭ}}$ – мощность на выходе топливного элемента, кВт; Δt – интервал времени в минутах, за который определялась выработка электроэнергии.

Энтальпия сгорания водорода составляет 286 кДж/моль . С учетом этого, значение Q можно определить на основе измерений расхода водорода, который переведен в количество вещества, измеряемого в моль:

$$Q = n \cdot 286, \quad (7)$$

где n – количество вещества (моль).

Значение n можно определить с учетом рабочих параметров ПОМТЭ (давление водорода и температура), используя уравнение Клапейрона-Менделеева:

$$n = (P \cdot V) / (R \cdot T), \quad (8)$$

где P – давление водорода на входе ПОМТЭ, атм; R – газовая постоянная ($R = 0,0821 \text{ л} \cdot \text{атм} / \text{моль} \cdot \text{К}$); T – температура, К.

На первом этапе с помощью экспериментальных исследований получены зависимости характеристик $\eta_{\text{ПОМТЭ}}$ и V от тока нагрузки ($I_{\text{ПОМТЭ}}$) при различных значениях давления водорода на входе ПОМТЭ (P).

На втором этапе проведен анализ полученных результатов и определены особенности корректировки системы управления ГЭК, обеспечивающие наибольшую эффективность работы в установившихся режимах.

*Методика исследования работы ПОМТЭ
при динамических изменениях нагрузки*

Работу ПОМТЭ при динамических изменениях нагрузки поясняет типовая переходная характеристика топливного элемента (рис. 3). Когда ток увеличивается, возникает провал напряжения, затем напряжение плавно восстанавливается и достигает установившегося значения в течение времени восстановления. При снижении тока происходит скачок напряжения с последующим восстановлением до равновесного значения [13].

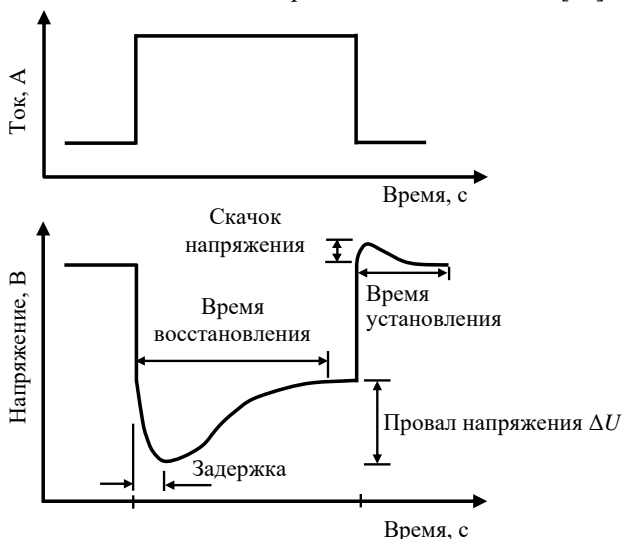


Рис. 3. Типовая переходная характеристика топливного элемента

Fig. 3. Typical fuel cell transient response

В качестве основных характеристик работы ПОМТЭ при динамических изменениях нагрузки в работе использованы:

- 1) минимальное значение напряжения при динамическом увеличении нагрузки U_{MIN} ;
- 2) максимальное значение напряжения при динамическом уменьшении нагрузки U_{MAX} ;

- 3) провал напряжения ΔU_{UN} , то есть разница между U_{MIN} и значением напряжения, которое устанавливается после динамического увеличения нагрузки;
- 4) скачок напряжения ΔU_{OV} , то есть разница между U_{MAX} и значением напряжения, которое устанавливается после динамического уменьшения нагрузки;
- 5) время восстановления T_{REC} , то есть время, за которое после динамического увеличения нагрузки напряжение увеличится до установившегося значения, соответствующего новому току нагрузки;
- 6) время установления T_{SET} , то есть время, за которое после динамического уменьшения нагрузки напряжение уменьшится до установившегося значения, соответствующего новому току нагрузки.

На первом этапе с помощью экспериментальных исследований получены значения характеристик U_{MIN} , U_{MAX} , ΔU_{UN} , ΔU_{OV} , T_{REC} , T_{SET} :

- для каждого начального значения тока нагрузки ($I_{НАЧ}$) от 0 до 20 А с шагом 2 А при увеличении нагрузки от $I_{НАЧ}$ до 22 А с шагом 2 А;
- для каждого конечного значения тока нагрузки ($I_{КОН}$) от 20 до 0 А с шагом 2 А при уменьшении нагрузки от 22 А до $I_{КОН}$ с шагом 2 А.

На втором этапе проведен анализ полученных результатов и определены особенности корректировки системы управления ГЭК, обеспечивающие надежное питание потребителя при динамическом изменении нагрузки.

III. Лабораторный стенд для исследования работы ПОМТЭ

Экспериментальные исследования работы ПОМТЭ проведены в лаборатории НГТУ. Структурная схема лабораторного стенда ПОМТЭ представлена на рис. 4.

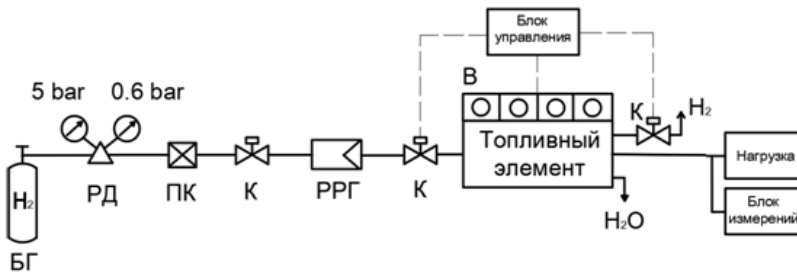


Рис. 4. Структурная схема лабораторного стенда с ПОМТЭ

Fig. 4. Structural scheme of the laboratory bench with PEMFC

Водород поступает в ПОМТЭ через регулятор давления, который снижает его до значения 0,6-0,8 атм. Подача водорода регулируется с помощью входного электромагнитного клапана. Выходной клапан необходим для сброса остатков неиспользованного водорода. Измерения тока и напряжения проводятся на выводах ПОМТЭ и отдельно на вентиляторах для подачи воздуха в ПОМТЭ. Расход газа измерялся с помощью регулятора расхода газа. Внешний вид лабораторного стенда показан на рис. 5.

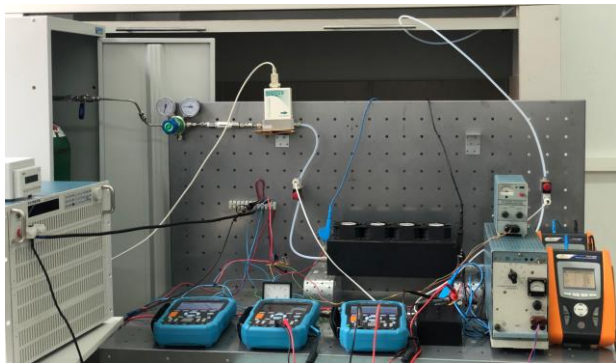


Рис. 5. Внешний вид лабораторного стенда

Fig. 5. Appearance of the laboratory stand

Основные технические параметры лабораторного стенда и исследуемого ПОМТЭ приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Основные технические параметры лабораторного стенда и ПОМТЭ

Table 1.
Main technical parameters of the laboratory stand and PEMFC

№	Параметр	Значение
1	Газ	H ₂ (99,99 %)
2	Давление на выходе газового баллона	150 атм
3	Давление на входе ПОМТЭ	0,6-0,8 атм
4	Установленная мощность ПОМТЭ	1 кВт
5	Номинальное напряжение ПОМТЭ	57 В
6	Номинальный ток ПОМТЭ	17,5 А
7	Напряжение питания вентиляторов подачи воздуха	48 В
8	Количество и номинальная мощность вентиляторов подачи воздуха	4×62,4 Вт

IV. Результаты исследований

Исследование потерь напряжения и внутреннего сопротивления ПОМТЭ

ВАХ топливного элемента зависит от давления водорода на входе топливного элемента. Построены вольт-амперная и мощностная характеристики при граничных значениях паспортного диапазона входного давления водорода (рис. 6).

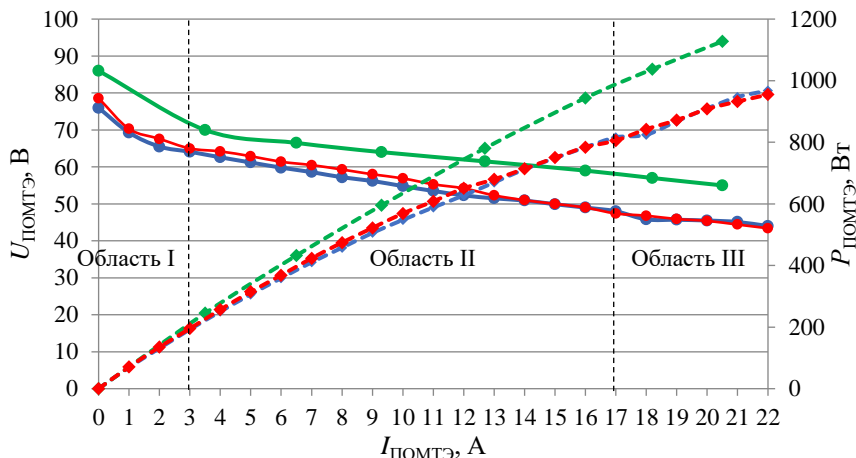


Рис. 6. Вольт-амперная (сплошная линия) и мощностная (пунктирная) характеристики ПОМТЭ:
паспортная при 0,6 атм (зеленый); фактические при 0,6 атм (синий) и 0,8 атм (красный)

Fig. 6. Volt-ampere characteristic (solid line) and power (dotted) characteristics of PEMFC:
passport at 0,6 atm (green); measured at 0,6 atm (blue) and 0,8 atm (red)

Работа ПОМТЭ в паспортном диапазоне давления водорода на входе (0,6-0,8 атм) характеризуется незначительными изменениями ВАХ. Значения $U_{\text{ПОМТЭ}}$ при $P = 0,8$ атм немного превышают значения $U_{\text{ПОМТЭ}}$ при $P = 0,6$ атм. Это соответствует закономерностям, полученным в других исследованиях [7, 8, 12]. Вместе с тем, фактические значения $U_{\text{ПОМТЭ}}$ во всех областях потерь на 5-10 В меньше значений напряжения, которые соответствуют паспортной ВАХ. Это можно объяснить тем, что паспортная ВАХ не учитывает затраты мощности на работу вентиляторов для подачи воздуха, а также процессом неизбежной деградации ПОМТЭ. Поэтому при уточнении параметров элементов УКЗУ будут учитываться именно факти-

ческие значения $U_{\text{ПОМТЭ}}$, полученные в ходе экспериментальных исследований. Для области II (омические потери) выполнена аппроксимация результатов измерений $U_{\text{ПОМТЭ}}$ при $P = 0,6$ атм и $0,8$ атм и получено уравнение прямой, описывающее ВАХ в этой области:

$$U_{\text{ПОМТЭ}} = 68,011 - 1,211 \cdot I_{\text{ПОМТЭ}}. \quad (9)$$

Из (9) следует, что значение внутреннего сопротивления ПОМТЭ $R_{\text{ПОМТЭ}} = 1,211$ Ом. Данное значение использовано для определения емкости фильтровых компенсаторов УКЗУ в составе ГЭК.

*Исследование характеристик ПОМТЭ
при работе в установившихся режимах*

Проведены измерения потребления водорода ПОМТЭ за 1 минуту при $P = 0,6$ атм и $P = 0,8$ атм. Измерения были проведены при изменении тока нагрузки от 0 до 22 А с шагом 1 А (рис. 7).

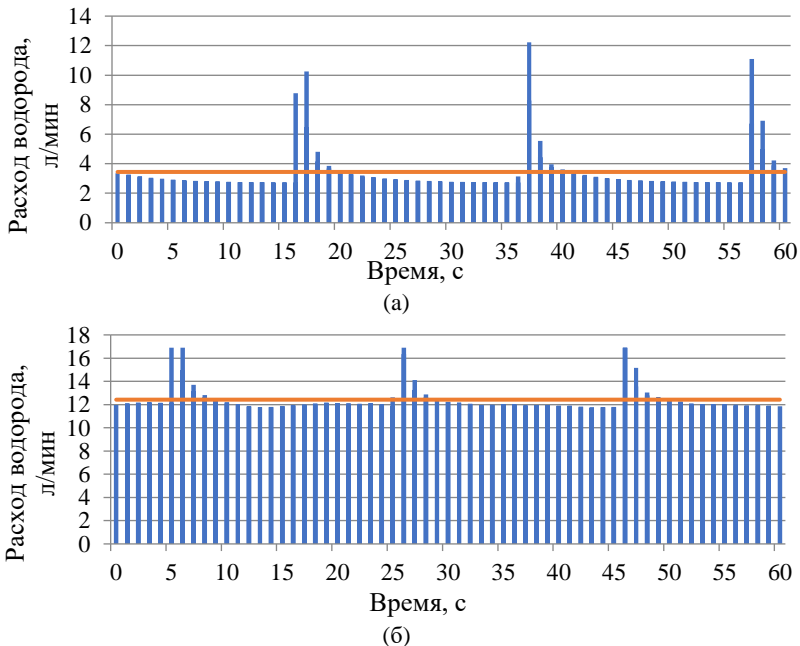


Рис. 7. Потребление водорода за 1 мин при 0,8 атм: $I_{\text{ПОМТЭ}} = 1$ А (а) и 15 А (б)

Fig. 7. Hydrogen consumption of for 1 min at 0,8 atm: $I_{\text{PEMFC}} = 1$ А (а); 15 А (б)

Рис. 7 показывает, что потребление водорода практически постоянно, но периодически возникают пики потребления, которые соответствуют открытию выходного клапана ПОМТЭ для выброса излишка водорода. Красной линией показан средний расход водорода за 1 мин при соответствующем токе нагрузки.

Построена зависимость среднего расхода водорода за 1 мин от тока нагрузки при $P = 0,6$ атм и $P = 0,8$ атм (рис. 8).

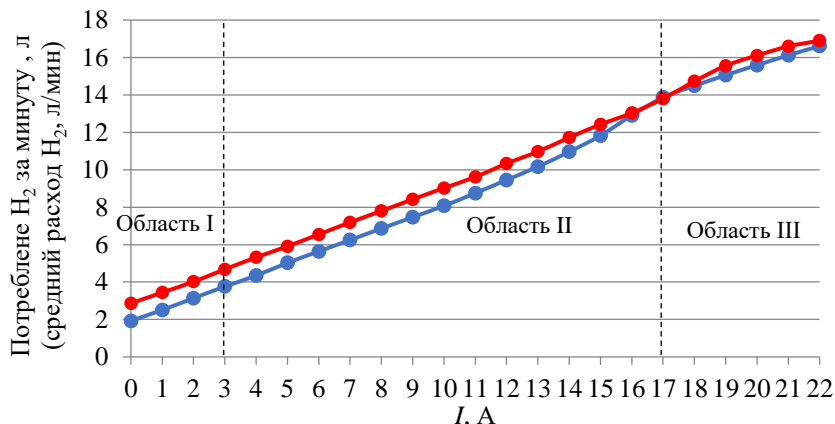


Рис. 8. Зависимость среднего расхода водорода за 1 мин от тока нагрузки при $P = 0,6$ атм (синяя) и $0,8$ атм (красная)

Fig. 8. Dependence of the average hydrogen consumption per 1 minute on the load current at $P = 0,6$ atm (blue) and $0,8$ atm (red)

Из рис. 8 следует, что зависимость среднего расхода водорода от тока нагрузки является линейной. При работе ПОМТЭ в области I и II средний расход водорода при $P = 0,8$ атм примерно на 1 л/мин больше, чем при $P = 0,6$ атм. Также были построены графики, показывающие, какой объем водорода и время необходимы для производства 1 кВтч электроэнергии в зависимости от тока нагрузки и давления водорода на входе (рис. 9).

Из рис. 9 следует, что для любой из точек ВАХ при $P = 0,6$ атм и $P = 0,8$ атм на выработку 1 кВтч электроэнергии, в целом, потребуются одинаковое время. Однако при работе ПОМТЭ при $P = 0,8$ атм в области I и II для выработки 1 кВтч электроэнергии потребуется больший объем водорода, чем при $P = 0,6$ атм. Объем водорода, необходимый для выработки 1 кВтч электроэнергии, увеличивается при снижении тока нагрузки. Так, при работе ПОМТЭ в области I расход водорода на выработку 1 кВтч электроэнергии более чем в 2 раза превышает расход в области II. Поэтому работа

ПОМТЭ в режиме малых нагрузок ($I_{\text{ПОМТЭ}}$ до 3 А) является неэффективной. В этом случае для повышения эффективности работы ГЭК целесообразным представляется переводить питание нагрузки на АБ.

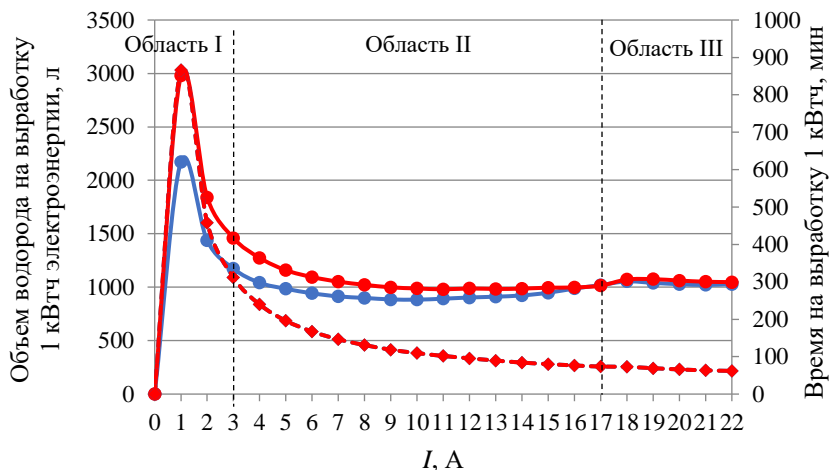


Рис. 9. Объем водорода (сплошная линия) и время, необходимые на выработку 1 кВтч электроэнергии (пунктирная линия) при $P = 0,6$ атм (синяя линия) и $0,8$ атм (красная линия)

Fig. 9. Volume of hydrogen (solid line) and time required to generate 1 kWh (dotted line) at $P = 0,6$ atm (blue) and $0,8$ atm (red)

На основе результатов измерений потребления водорода для каждой точки ВАХ от 0 до 22 А с шагом 1 А выполнены расчеты (5, 8) и определены значения $W_{\text{ПОМТЭ}}$, Q и $\eta_{\text{ПОМТЭ}}$. При выполнении расчетов принято среднее значение температуры $T = 25^\circ\text{C}$ (рис. 10).

Зависимость $\eta_{\text{ПОМТЭ}}$ от тока нагрузки показана на рис. 11. Показано, что КПД выше при работе ПОМТЭ на нижней границе паспортного диапазона входного давления водорода. Это можно объяснить тем, что при $P = 0,8$ атм увеличиваются потери водорода, которые выбрасываются через выходной клапан ПОМТЭ. Наибольшие значения КПД (около 45 %) соответствуют работе ПОМТЭ в области II. В области III значения КПД уменьшаются и практически не изменяются с ростом тока.

На основе результатов исследований характеристик работы ПОМТЭ в установившихся режимах предложены следующие корректировки системы управления ГЭК.

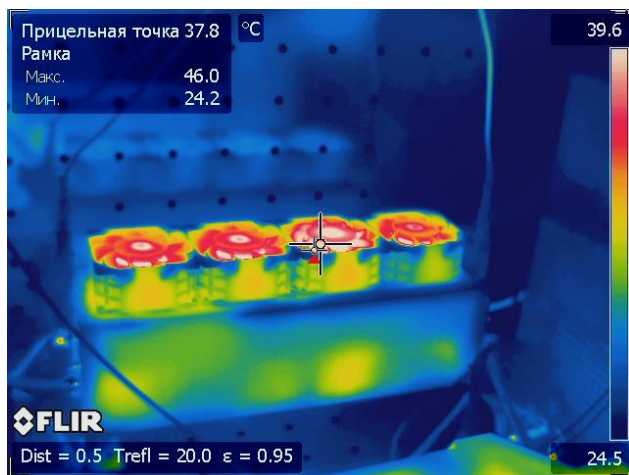


Рис. 10. Тепловизионная съемка ПОМТЭ в ходе испытаний

Fig. 10. Thermal imaging of PEMFC during testing

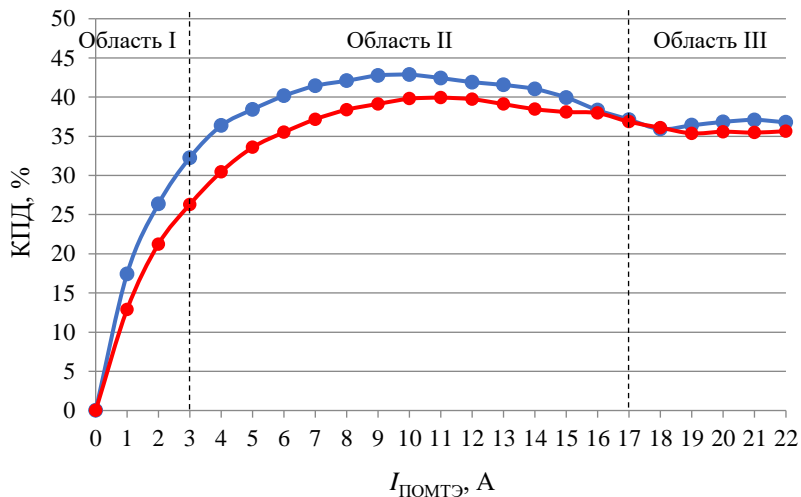


Рис. 11. Зависимость КПД ПОМТЭ от тока нагрузки при $P = 0,6$ атм (синяя линия) и $0,8$ атм (красная линия)

Fig. 11. Dependence of efficiency on the load current at $P = 0,6$ atm (blue) and $0,8$ atm (red)

1. Значения напряжения на ВАХ более приближены к паспортной характеристике при $P = 0,8$ атм (верхняя граница паспортного диапазона давления водорода на входе). Однако средний расход водорода и объем водорода, требуемый для производства 1 кВтч электроэнергии, ниже, а КПД работы ПОМТЭ, соответственно, выше при $P = 0,6$ атм (нижняя граница паспортного диапазона давления водорода на входе). Поэтому при работе ПОМТЭ в установившихся режимах предлагается поддерживать давление водорода на входе 0,6 атм.

2. Наибольший КПД 45 % достигается при работе ПОМТЭ в области II. При переходе в область III КПД работы ПОМТЭ снижается до 35 %. Поэтому при токах нагрузки более 17 А предлагается совместное использования ПОМТЭ и АБ. Это позволит повысить на 5-10 % КПД работы ПОМТЭ и, соответственно, эффективность работы ГЭК.

3. Установлено, что при работе ПОМТЭ в области I КПД составляет около 25 %, а объем водорода, необходимый для производства 1 кВтч электроэнергии, практически в 2 раза выше, чем при работе ПОМТЭ в области II. Поэтому для повышения автономности работы ГЭК при малых нагрузках (до 2 А) предлагается переходить на питание нагрузки только от АБ (при условии достаточного уровня заряда АБ). Таким образом, для работы ПОМТЭ в установившихся режимах наиболее эффективной является область II (область омических потерь).

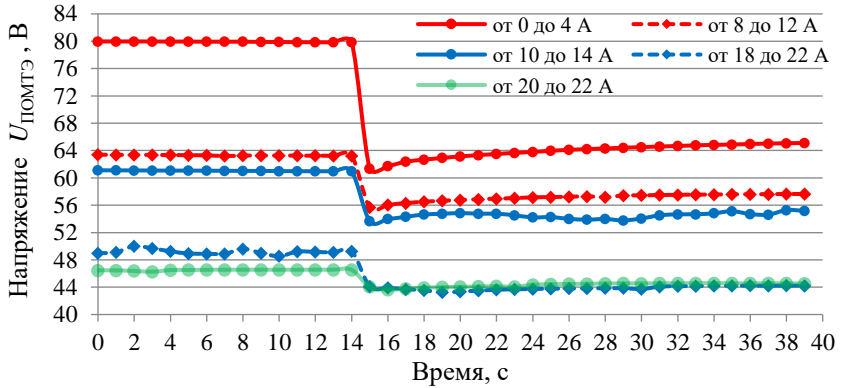
Исследования характеристик ПОМТЭ при динамических изменениях нагрузки

Проведена серия экспериментов, в которых начальный ток нагрузки ($I_{НАЧ}$) мгновенно увеличивался до заданного конечного значения ($I_{КОН}$) и после достижения установившегося режима вновь мгновенно уменьшался до $I_{НАЧ}$. Полученные диаграммы изменения $U_{ПОМТЭ}$ для различных значений $I_{НАЧ}$ приведены на рис. 12. Диаграммы изменения $U_{ПОМТЭ}$ в зависимости от особенностей их характеристик могут быть разделены на 3 группы.

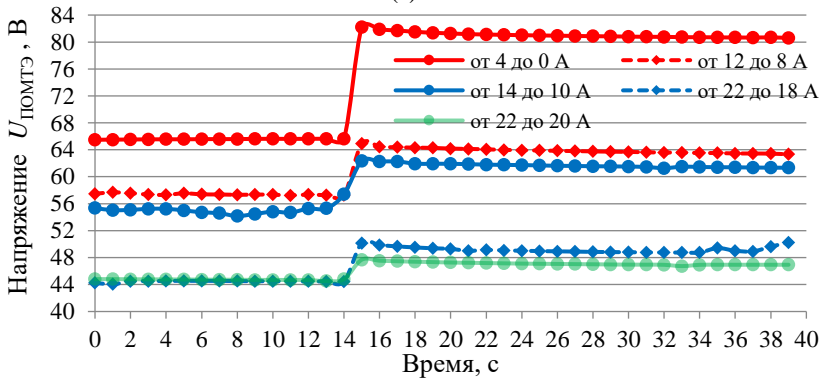
Группа 1 – изменение $U_{ПОМТЭ}$ при динамическом изменении $I_{ПОМТЭ}$ при $I_{НАЧ}$ от 0 до 8 А. Диаграммы изменения $U_{ПОМТЭ}$ полностью соответствуют типовой переходной характеристики топливного элемента (рис. 3). На основе этих диаграмм возможно определить характеристики U_{MIN} , U_{MAX} , ΔU_{UN} , ΔU_{OV} и построить их зависимости.

Группа 2 – изменение $U_{ПОМТЭ}$ при динамическом изменении $I_{ПОМТЭ}$ при $I_{НАЧ}$ от 10 до 18 А. Диаграммы изменения $U_{ПОМТЭ}$ отличаются от типовой переходной характеристики топливного элемента. При динамическом изменении нагрузки наблюдаются колебания $U_{ПОМТЭ}$, которые характеризуются большой частотой при небольших амплитудах (несколько В). Это не позволяет точно определить характеристики ΔU_{UN} , ΔU_{OV} , T_{REC} и T_{SET} .

Группа 3 – изменение $U_{\text{ПОМТЭ}}$ при динамическом изменении $I_{\text{ПОМТЭ}}$ при $I_{\text{НАЧ}}$ от 20 до 22 А. Диаграммы изменения $U_{\text{ПОМТЭ}}$ характеризуются тем, что колебания $U_{\text{ПОМТЭ}}$ становятся значительно меньше, и диаграмма соотносится с типовой переходной характеристикой топливного элемента.



(а)



(б)

Рис. 12. Диаграммы изменения выходного напряжения $U_{\text{ПОМТЭ}}$ при изменении тока нагрузки (красная линия):
рост нагрузки (а); снижение нагрузки (б)

Fig. 12. Diagrams of changes in the output voltage of PEMFC U_{PEMFC} when the load current changes:
load increase (a); load decrease (b)

Колебания $U_{\text{ПОМТЭ}}$ на диаграммах из группы 2 можно объяснить работой вентиляторов, которые обеспечивают подачу воздуха. На рис. 13 показана диаграмма изменения потребляемой мощности вентиляторами в зависимости от тока нагрузки.

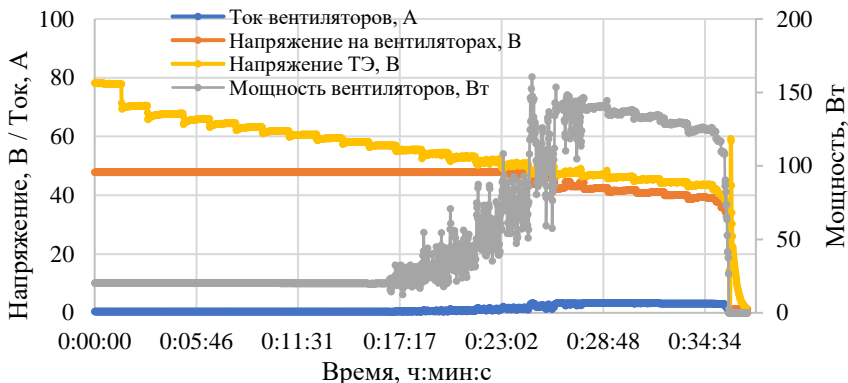


Рис. 13. Характеристики работы вентиляторов подачи воздуха:
ток (синий); напряжение (красный); мощность (зеленый) вентиляторов
и напряжение на выходе ПОМТЭ (фиолетовый)

Fig. 13. Characteristics of the operation of fans providing air supply:
current (blue); voltage (red); power (green) and PEMFC output voltage (purple)

Из рис. 13 следует, что при $I_{\text{НАЧ}}$ от 0 до 10 А вентиляторы постоянно потребляют одинаковую мощность, равную 20 Вт. На этом интервале диаграммы изменения выходного напряжения ПОМТЭ соответствуют типовой переходной характеристике топливного элемента (колебания напряжения отсутствуют). На интервале $I_{\text{НАЧ}}$ от 10 до 18 А мощность, потребляемая вентиляторами, увеличивается от 20 до 160 Вт. При этом на всем интервале наблюдаются существенные колебания потребляемой мощности (амплитудой до 40 Вт). Это приводит к колебаниям подачи воздуха, необходимого для работы топливного элемента, что при динамических изменениях нагрузки приводит к появлению колебаний $U_{\text{ПОМТЭ}}$. При достижении $I_{\text{НАЧ}}$ 20 А потребляемая вентиляторами мощность снова стабилизируется (равна примерно 130 Вт). Как следствие, при $I_{\text{НАЧ}} = 20$ А на диаграмме изменения выходного напряжения ПОМТЭ исчезают колебания $U_{\text{ПОМТЭ}}$.

Для стабилизации работы ПОМТЭ при динамических изменениях нагрузки предлагается в структуру ГЭК добавить дополнительный отдельный источник для питания вентиляторов, подающих воздух в топливный элемент. Мощность, потребляемая вентиляторами, будет задаваться в зависимости от тока нагрузки.

Для диаграмм изменения $U_{\text{ПОМТЭ}}$, относящихся к группам 1 и 3, определены значения U_{MIN} , U_{MAX} , ΔU_{UN} , ΔU_{OV} . На основе диаграмм из группы 2 можно определить только значения характеристик U_{MIN} и U_{MAX} . На рис. 14 показаны зависимости значений U_{MIN} и ΔU_{UN} от I_{KOH} . При динамическом увеличении нагрузки выходное напряжение ПОМТЭ опускается тем ниже, чем больше конечное значение тока нагрузки I_{KOH} . При одинаковых I_{KOH} напряжение опускается ниже при меньших значениях $I_{\text{НАЧ}}$. Так, при увеличении нагрузки от 0 до 22 А ($I_{\text{НАЧ}} = 0$ А; $I_{\text{KOH}} = 22$ А) $U_{\text{ПОМТЭ}}$ уменьшилось до 35 В, и произошло отключение ПОМТЭ. Полученные результаты подтверждают, что наиболее опасными являются динамические увеличения нагрузки до максимальных значений при работе ПОМТЭ в режиме, близком к холостому ходу. Значения ΔU_{UN} характеризуют восстановление выходного напряжения ПОМТЭ после переходного процесса. При одинаковых I_{KOH} значения ΔU_{UN} тем больше, чем меньше значение начального тока нагрузки $I_{\text{НАЧ}}$. На рис. 15 показаны зависимости значений U_{MAX} и ΔU_{OV} от $I_{\text{НАЧ}}$. При динамическом уменьшении нагрузки, в целом наблюдаются зависимости характеристик ПОМТЭ, аналогичные тем, что и при увеличении нагрузки. Выходное напряжение ПОМТЭ увеличивается при увеличении разницы между I_{KOH} и $I_{\text{НАЧ}}$. Наибольшие значения выходного напряжения наблюдаются при уменьшении нагрузки от 22 до 0 А.

Зависимости U_{MIN} и ΔU_{UN} , а также U_{MAX} и ΔU_{OV} использованы при определении параметров входного конвертора в составе УКЗУ. Входное напряжение конвертора должно предусматривать возможность изменения выходного напряжения ПОМТЭ от наименьшего значения U_{MIN} до наибольшего значения U_{MAX} .

V. Заключение

Среди типов топливных элементов для электроснабжения стационарных потребителей мощностью до 50 кВт наиболее эффективными считаются ПОМТЭ. Однако, ПОМТЭ характеризуются недостаточной маневренностью при динамически изменяющихся нагрузках. Эта проблема решается путем сочетания ПОМТЭ с аккумуляторными батареями в едином гибридной энергетическом комплексе (ГЭК).

В НГТУ разработан экспериментальный образец ГЭК на основе ПОМТЭ и литий-железо-фосфатных АБ для питания стационарных потребителей железнодорожной отрасли. Проведены экспериментальные исследования работы ПОМТЭ в установившихся и динамических режимах работы. Для используемого в ГЭК ПОМТЭ построены вольт-амперная и мощностная характеристики, которые показали, что фактические значения выходного напряжения ПОМТЭ во всех областях потерь на 5-10 В меньше значений напряжения для паспортной ВАХ. На основе аппроксимации резуль-

татов измерений для области омических потерь определено значение внутреннего сопротивления ПОМТЭ ($R_{\text{ПОМТЭ}} = 1,211 \text{ Ом}$), которое использовано для определения емкости фильтровых компенсаторов УКЗУ в составе ГЭК.

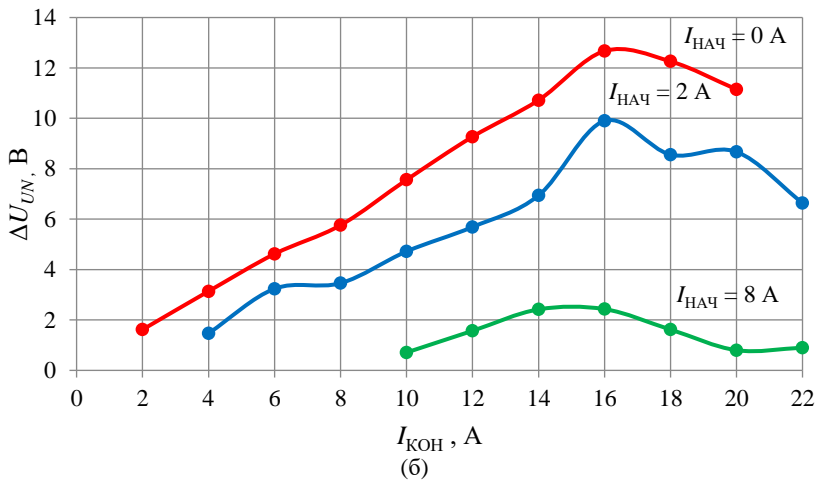
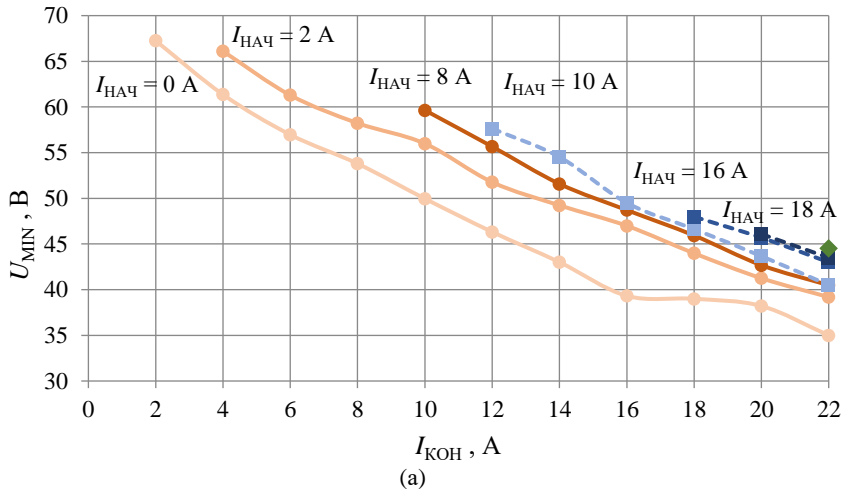


Рис. 14. Зависимости характеристик ПОМТЭ при динамическом увеличении нагрузки: U_{MIN} от $I_{\text{КОН}}$ (а); ΔU_{UN} от $I_{\text{КОН}}$ (б)

Fig. 14. Dependences of the characteristics of PEMFC with a dynamic increase in load: U_{MIN} от $I_{\text{КОН}}$ (а); ΔU_{UN} от $I_{\text{КОН}}$ (б)

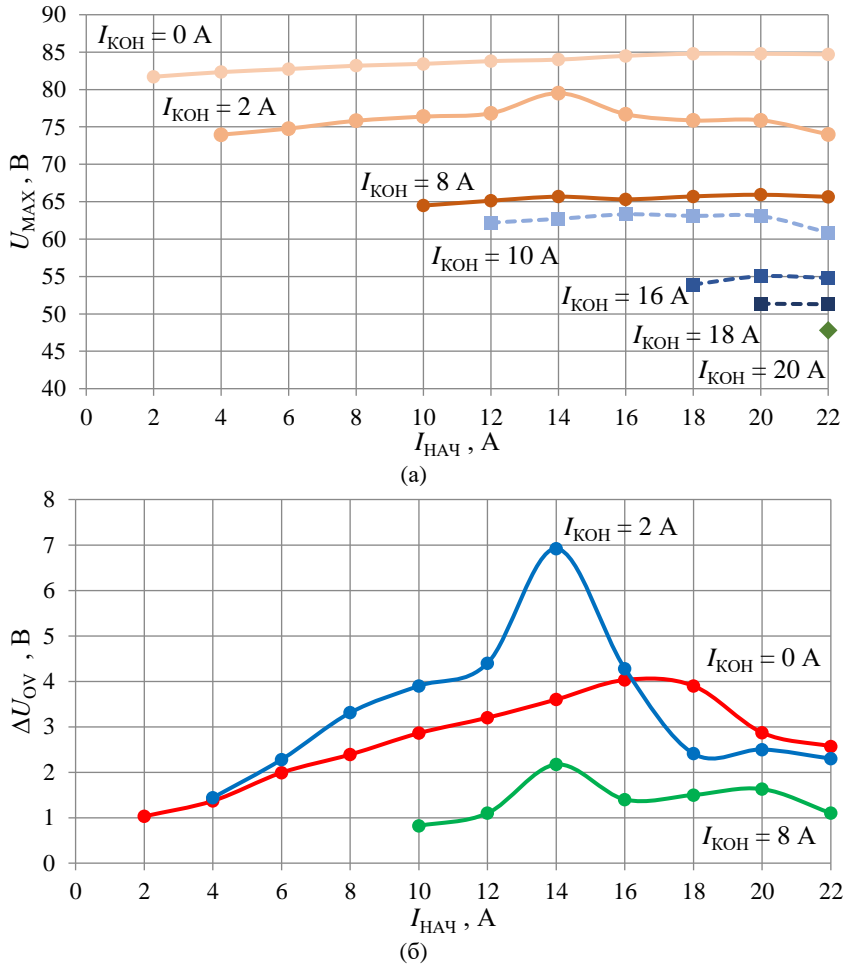


Рис. 15. Зависимости характеристик ПОМТЭ при динамическом уменьшении нагрузки: U_{MAX} от I_{HACH} (а); ΔU_{OV} от I_{HACH} (б)

Rice. 15. Dependences of the characteristics of PEMFC with dynamic load reduction: U_{MAX} от I_{HACH} (а); ΔU_{OV} от I_{HACH} (б)

Установлено, что наибольший КПД (около 45 %) достигается при работе ПОМТЭ в области омических потерь. Результаты экспериментальных

исследований характеристик ПОМТЭ при работе в установившихся режимах будут использованы для корректировки системы управления ГЭК:

- продолжительная работа ПОМТЭ в области активационных потерь характеризуется завышенным расходом водорода на производство электроэнергии и низким КПД (не более 25 %), поэтому питание потребителей при малых нагрузках предлагается переводить на аккумуляторные батареи;
- при работе ПОМТЭ в области концентрационных потерь КПД составляет около 35 %, поэтому для повышения КПД работы ПОМТЭ и ГЭК в целом при больших токах нагрузки предлагается совместное использование ПОМТЭ и АБ.

Проведены исследования характеристик ПОМТЭ при динамических изменениях нагрузки. На характеристики работы ПОМТЭ оказывает влияние работа вентиляторов, которые подают воздух. При работе ПОМТЭ в диапазоне нагрузки от 10 до 18 А при динамических изменениях нагрузки наблюдаются существенные колебания выходного напряжения ПОМТЭ. Для стабилизации работы ПОМТЭ при динамических изменениях нагрузки предлагается в структуру ГЭК добавить дополнительный отдельный источник для питания вентиляторов, подающих воздух в топливный элемент. Выполнен анализ зависимостей характеристик U_{\min} , U_{\max} , ΔU_{UN} , ΔU_{OV} от начального и конечного токов нагрузки. Полученные зависимости использованы при определении параметров входного конвертора в составе УКЗУ ГЭК.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51016.

© Лоскутов А.Б., 2022

© Липужин И.А., 2022

© Бедретдинов Р.Ш., 2022

Поступила в редакцию 30.09.2022

Received 30.09.2022

Библиографический список

- [1] Zhou D., Ravey A., Al-Durra A., Gao F. A comparative study of extremum seeking methods applied to online energy management strategy of fuel cell hybrid electric vehicles // Energy Conversion and Management. 2017. Vol. 151. P. 778-790. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.08.079
- [2] Meng X., Li Q., Zhang G., Wang T., Chen W., Cao T. A dual-mode energy management strategy considering fuel cell degradation for energy consumption and fuel cell

- efficiency comprehensive optimization of hybrid vehicle // IEEE Access. 2019. No. 7. P. 134475-134487. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2939047
- [3] Kulikov A., Loskutov A., Shalukho A., Bedretdinov R., Lipuzhin I., Kryukov E., Kurkin A., Kozelkov A., Dar'enkov A., Vanyaev V., Shahov A. Development and operation modes of hydrogen fuel cell generation system for remote consumers' power supply // Sustainability. 2021. No. 13 (16). DOI: 10.3390/su13169355
- [4] Hsu S., Liang S. Optimal efficiency of fuel cell/battery hybrid power management // proc. 2012 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), Nov. 26-29, 2012, Saigon, Vietnam. P. 231-235. DOI: 10.1109/IC-CAIS.2012.6466593
- [5] Xie C., Xu X., Bujlo P., Shen D., Zhao H., Quan S. Fuel cell and lithium iron phosphate battery hybrid powertrain with an ultracapacitor bank using direct parallel structure // Journal of Power Sources. 2015. No. 279. P. 487-494. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.01.029
- [6] Yu Y., Li Q., Chen W., Su B., Liu J., Ma L. Optimal energy management and control in multimode equivalent energy consumption of fuel cell/supercapacitor of hybrid electric tram // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2019. No. 66 (8). P. 6065-6076. DOI: 10.1109/TIE.2018.2871792
- [7] Sharma M., Pachauri R.K., Goel S.K. MATLAB/Simulink modeling and analysis of parametric effects on PEMFC performance // proc. 2015 International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE), Mar. 12-13, 2015, Noida, India. P. 226-231. DOI: 10.1109/RDCAPE.2015.7281400
- [8] Belmokhtar K., Hammoudi M., Doumbia M.L. and Agbossou K. Modelling and fuel flow dynamic control of proton exchange membrane fuel cell // proc. 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, May 13-17, 2013, Istanbul, Turkey. P. 415-420. DOI: 10.1109/PowerEng.2013.6635643
- [9] Pandian M.S., Anwari M., Husodo B.Y., Hiendro A. Efficiency and economics analysis of proton exchange membrane fuel cell // proc. 2010 Conference Proceedings IPEC, Oct. 13-17, 2010, Singapore. P. 875-880. DOI: 10.1109/IPE-CON.2010.5697089
- [10] Adegnon K.M., Dube Y., Agbossou K. Experimental evaluation of PEM Fuel Cell systems efficiency // proc. 2009 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, May 03-06, 2009, St. John's, NL, Canada. P. 716-719. DOI: 10.1109/CCECE.2009.5090223
- [11] Guaitolini S.V.M., Yahyaoui I., Fardin J.F., Encarnação L.F., Tadeo F. A review of fuel cell and energy cogeneration technologies // proc. 2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC), Mar. 20-22, 2018, Hammamet, Tunisia. DOI: 10.1109/IREC.2018.8362573
- [12] Chaudhary S., Chauhan Y.K. Studies and performance investigations on fuel cells // 2014 International Conference on Advances in Engineering and Technology Research (ICAETR-2014), Aug. 01-02, 2014, Unnao, India: IEEE, 2014. DOI: 10.1109/ICAETR.2014.7012957
- [13] Edwards R.L., Demuren A.O. Regression analysis of PEM fuel cell transient response // International Journal of Energy and Environmental Engineering 7 (3). 2016. No. 329-341. DOI: 10.1007/S40095-016-0209-1

- [14] Barbir F., Gomez T. Efficiency and economics of proton exchange membrane (PEM) fuel cell // *International Journal of Hydrogen Energy*. 1997. No. 22 (10-11). P. 1027-1037. DOI: 10.1016/S0360-3199(96)00175-9

References

- [1] D. Zhou, A. Ravey, A. Al-Durra, and F. Gao, "A comparative study of extremum seeking methods applied to online energy management strategy of fuel cell hybrid electric vehicles", *Energy Conversion and Management*, vol. 151, pp. 778-790, Nov. 2017. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.08.079
- [2] X. Meng, Q. Li, G. Zhang, T. Wang, W. Chen and T. Cao, "A dual-mode energy management strategy considering fuel cell degradation for energy consumption and fuel cell efficiency comprehensive optimization of hybrid vehicle", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 134475-134487, Sep. 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2939047
- [3] A. Kulikov, A. Loskutov, A. Shalukho, R. Bedretdinov, I. Lipuzhin, E. Kryukov, A. Kurkin, A. Kozelkov, A. Dar'enkov, V. Vanyaev and A. Shahov, "Development and operation modes of hydrogen fuel cell generation system for remote consumers' power supply", *Sustainability*, vol. 13, no. 16, 2021. DOI: 10.3390/su13169355
- [4] S. Hsu and S. Liang, "Optimal efficiency of fuel cell/battery hybrid power management", in *proc. 2012 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, Nov. 26-29, 2012, Saigon, Vietnam, pp. 231-235. DOI: 10.1109/ICCAIS.2012.6466593
- [5] C. Xie, X. Xu, P. Bujlo, D. Shen, H. Zhao, and S. Quan, "Fuel cell and lithium iron phosphate battery hybrid powertrain with an ultracapacitor bank using direct parallel structure", *Journal of Power Sources*, vol. 279, pp. 487-494, 2015. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.01.029
- [6] Y. Yu, Q. Li, W. Chen, B. Su, J. Liu, and L. Ma, "Optimal energy management and control in multimode equivalent energy consumption of fuel cell/supercapacitor of hybrid electric tram", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 8, pp. 6065-6076, 2019. DOI: 10.1109/TIE.2018.2871792
- [7] M. Sharma, R.K. Pachauri and S.K. Goel, "MATLAB/Simulink modeling and analysis of parametric effects on PEMFC performance", in *proc. 2015 International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE)*, Mar. 12-13, 2015, Noida, India, pp. 226-231. DOI: 10.1109/RDCAPE.2015.7281400
- [8] K. Belmokhtar, M. Hammoudi, M.L. Doumbia and K. Agbossou, "Modelling and fuel flow dynamic control of proton exchange membrane fuel cell", in *proc. 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, May 13-17, 2013, Istanbul, Turkey, pp. 415-420. DOI: 10.1109/PowerEng.2013.6635643
- [9] M.S. Pandian, M. Anwar, B.Y. Husodo and A. Hiendro, "Efficiency and economics analysis of proton exchange membrane fuel cell", in *proc. 2010 Conference Proceedings IPEC*, Oct. 13-17, 2010, Singapore, pp. 875-880. DOI: 10.1109/IPE-CON.2010.5697089

- [10] K.M. Adegnon, Y. Dube and K. Agbossou, “Experimental evaluation of PEM Fuel Cell systems efficiency”, in proc. *2009 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, May 03-06, 2009, St. John's, NL, Canada, pp. 716-719. DOI: 10.1109/CCECE.2009.5090223
- [11] S.V.M. Guaitolini, I. Yahyaoui, J.F. Fardin, L.F. Encarnação and F. Tadeo, “A review of fuel cell and energy cogeneration technologies”, in proc. *2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC)*, Mar. 20-22, 2018, Hammamet, Tunisia. DOI: 10.1109/IREC.2018.8362573
- [12] S. Chaudhary and Y.K. Chauhan, “Studies and performance investigations on fuel cells”, in proc. *2014 International Conference on Advances in Engineering and Technology Research (ICAETR-2014)*, Aug. 01-02, 2014, Unnao, India. DOI: 10.1109/ICAETR.2014.7012957
- [13] R.L. Edwards and A.O. Demuren, “Regression analysis of PEM fuel cell transient response”, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 7 (3), pp. 329-341, May 2016. DOI: 10.1007/S40095-016-0209-1
- [14] F. Barbir and T. Gomez, “Efficiency and economics of proton exchange membrane (PEM) fuel cell”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 22, no. 10-11, pp. 1027-1037, Oct. 1997. DOI: 10.1016/S0360-3199(96)00175-9

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лоскутов Алексей Борисович, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Alexey B. Loskutov, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Липужин Иван Алексеевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Ivan A. Lipuzhin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Бедретдинов Рустам Шамилевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Rustam Sh. Bedretdinov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation