

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ) (2.3.3)

УДК 681.51

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-169-181

Управление в целях обеспечения балансовой надежности электроснабжения на основе солнечной генерации с водородным аккумулированием энергии

И.М. Молотов, А.И. Счастливцев, Д.О. Дуников, М.Р. Масленникова, С.В. Мезин,
О.М. Проталинский

Проблема автономного энергоснабжения удалённых объектов народного хозяйства характерна для стран с большой территорией и низкой плотностью населения. Представлена разработка имитационной модели проекта автономного электроснабжения на базе фотоэлектрической солнечной генерации в качестве основного источника энергии и гибридного накопителя энергии, состоящего из литий-ионной аккумуляторной батареи и водородного накопителя энергии с хранением в виде сжатого газа. Моделирование выполнено в Matlab Simulink с использованием библиотеки мультифизического моделирования Simscape. Приведены методика, программная реализация и результаты имитационного моделирования.

Ключевые слова: водородный накопитель, балансировка мощности, управление, автономное энергоснабжение, фотоэлектрическая генерация, имитационное моделирование, балансовая надежность.

Для цитирования: Молотов И.М., Счастливцев А.И., Дуников Д.О., Масленникова М.Р., Мезин С.В., Проталинский О.М. Управление в целях обеспечения балансовой надежности электроснабжения на основе солнечной генерации с водородным аккумулированием энергии // Вестник МЭИ. 2023. № 5. С. 169—181. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-169-181.

Control to Ensure the Balance Reliability of Power Supply Based on Solar Generation with Hydrogen Energy Storage

I.M. Molotov, A.I. Schastlivtsev, D.O. Dunikov, M.R. Maslennikova, S.V. Mezin, O.M. Protalinsky

The problem of autonomous power supply to remote national economy facilities is typical for countries with a large territory and low population density. The article presents the development of a simulation model of an autonomous power supply project based on photovoltaic solar generation as the main energy source and a hybrid energy storage consisting of a lithium-ion storage battery and a hydrogen energy storage with energy stored in the form of compressed gas. The simulation is carried out in the Matlab Simulink environment using the Simscape multi-physical modeling library. The methodology, software implementation and simulation results are presented.

Key words: hydrogen storage, power balancing, control, autonomous power supply, photovoltaic generation, simulation, balance reliability.

For citation: Molotov I.M., Schastlivtsev A.I., Dunikov D.O., Maslennikova M.R., Mezin S.V., Protalinsky O.M. Control to Ensure the Balance Reliability of Power Supply Based on Solar Generation with Hydrogen Energy Storage. Bulletin of MPEI. 2023;5:169—181. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-169-181.

Введение

Согласно прогнозам, современный рост мирового потребления энергии ведет к снижению запасов ископаемых топлив [1, 2] и, вместе с тем, увеличению антропогенного воздействия на климат [3]. В этой связи, международными усилиями проводится климатичес-

кая политика [4], направленная на развитие низкоуглеродной экономики [5]. В рамках указанной климатической повестки мировая энергетика претерпевает период структурных изменений спроса на энергоресурсы, связанные с замещением использования ископаемых топлив альтернативными энергетическими ре-

сурсами с низким уровнем выбросов парниковых газов [6, 7].

Для обеспечения устойчивого развития энергетики РФ энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2035 г. [8] (далее – Стратегия) предусматривается, в том числе, структурная диверсификация энергетики, в рамках которой углеродная энергетика дополнится низкоуглеродной, а централизованное электроснабжение – децентрализованным. К технологиям, которые могут повлечь переход энергетики на новый технологический базис, относят, в частности, возобновляемые источники (ВИЭ) и накопители энергии [9]. В этих условиях, согласно Стратегии, водородным энергетическим технологиям отводится особенная роль, поскольку водород способен стать экологически нейтральным энергоносителем и инструментом, применение которого будет способствовать ресурсосбережению и низкоуглеродному развитию.

В концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации [10], дополняющей и конкретизирующей Стратегию в части развития водородной энергетики, отмечается, что основными преимуществами водорода являются возможность его получения из различных источников, широкая область использования для транспорта, накопления, хранения, доставки и выработки энергии, а также отсутствие антропогенного воздействия на окружающую среду при обращении в качестве энергоносителя. В числе технологий, удовлетворяющих целям развития низкоуглеродной экономики, помимо крупномасштабного производства водорода за счет энергии объектов централизованного энергоснабжения, считается применение водорода, полученного методом электролиза воды с использованием электроэнергии ВИЭ. Ожидается, что в долгосрочной перспективе до 2050 г. стоимость водорода, произведенного с помощью ВИЭ, способна стать конкурентоспособной относительно стоимости низкоуглеродного водорода, добываемого из ископаемых видов топлива. Таким образом, в настоящее время в качестве одного из приоритетных направлений рассматривает-

ся получение водорода на основе мощностей ВИЭ в тех регионах, где его себестоимость будет конкурентоспособной по сравнению с традиционными энергоносителями. Более широкое использование ВИЭ с водородным аккумулированием энергии способствует развитию изолированных регионов за счет повышения эффективности автономных систем электроснабжения и снижения зависимости от северного завоза.

Представлена разработка имитационной модели (ИМ) проекта автономного электроснабжения на базе фотоэлектрической (ФЭ) солнечной генерации в качестве основного источника энергии и гибридного накопителя энергии, состоящего из литий-ионной аккумуляторной батареи (АБ) и водородного накопителя энергии с хранением в виде сжатого газа (далее — микроэлектростанция). Для вторичной генерации электроэнергии внутри сети из запасенного водорода использован водородный топливный элемент (ТЭ). Проектируемый объект рассмотрен применительно к автономному электроснабжению, однако он предусматривает возможность присоединения к сети для работы в режиме параллельного использования электроэнергии.

Архитектура проекта микроэлектростанции и система управления технологическим процессом

Объект управления — проект автономного электроснабжения, работа которого организована следующим образом (рис. 1, таблица):

- контроллер точки максимальной мощности (ТММ), встроенный в многофункциональный солнечный инвертор 2, осуществляет отбор максимальной мощности от солнечных панелей 1;
- инвертор 2 преобразует генерируемый постоянный ток в перемененный ток шины подключения потребителей мощности (шина AC);
- избыточной электроэнергией от солнечной генерации посредством контроллера заряда батареи, интегрированного с многофункциональным инвертором 2, заряжается АБ 3, обеспечивающая гладкое сглаживание не-

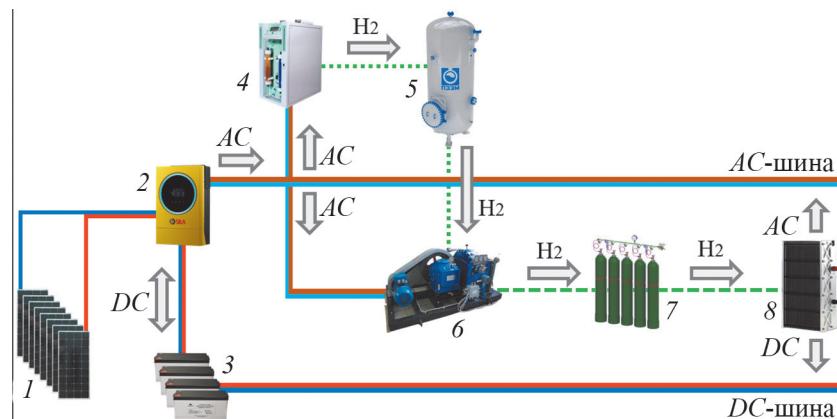


Рис. 1. Архитектура проектируемой автономной микроэлектростанции

Основные технические характеристики оборудования

Наименование	Параметр	Значение
Солнечная батарея	Мощность, Вт	540
Многофункциональный солнечный инвертор	Мощность, кВт	8
	Пиковая мощность (кратковременно), кВт	16
Литий-ионный аккумулятор	Емкость, А·ч	200
Электролизер	Производительность по водороду, л/ч	0...500
	Потребляемая мощность, ВА	2250
	Выходное давление по водороду, ати	до 5
Водородный компрессор	Производительность, $\text{нм}^3/\text{ч}$	0...3
	Давление входа избыточное, атм.	1
	Давление выходное избыточное, атм.	200
	Максимальная мощность, кВт	0,0...2,2
Ресивер	Рабочее давление, атм.	0...5
Стандартный газовый баллон	Рабочее давление, атм.	0...200
	Объем, л	50
Водородный топливный элемент	Номинальная мощность, Вт	1000
	Номинальная производительность, В(А)	28,8(35)
	Давление водорода на входе, атм.	0,45...0,55
	Расход при максимальной мощности	13

равномерностей генерации в краткосрочный интервал времени;

- когда АБ заряжена, электролизер 4 за счет остаточной солнечной генерации методом электролиза воды нарабатывает водород в ресивер 5, затем он комбинируется водородным компрессором 6 в газовые баллоны 7 для долгосрочного хранения запасенной энергии в виде сжатого газа;
- накапленный резерв используется ТЭ 8 для вторичной выработки электроэнергии внутри системы.

Следует отметить, что топология проектируемой микроэлектростанции в части подключения электрического выхода ТЭ к шине с потребителями мощности, может быть различной (см. рис. 1), а именно — постоянный ток генерируемый ТЭ может быть подключен как к шине постоянного тока (*DC*-шине) через преобразователь напряжения, так и к шине переменного тока (*AC*-шине) посредством стабилизатора напряжения для согласования частоты тока. Однако способ подключения ТЭ к шине с потребителями мощности не имеет принципиального значения для учета баланса мощности.

Постановка задачи управления

Влияние различных режимов работы энергоснабжения с водородным аккумулированием энергии на баланс мощности и энергии является предметом тщательного исследования [11 — 13]. При этом ИМ замкнутой энергетической системы, включающая гибридное хранилище энергии, состоящее из литий-ионного аккумулятора и водородного накопителя, рассматривалась лишь в одной схожей работе [14] с подобным под-

ходом, однако цели, задачи и состав технологического оборудования имеют существенные отличия от настоящей работы. Главная цель настоящей работы — разработка ИМ с целевой функцией управления, обеспечивающей балансовую надежность электроснабжения. Предполагается, что созданная модель должна послужить в качестве основы для дальнейшего развития, что по мере детализации модели, позволит расширить область ее применения. Наиболее актуальными видятся направления, сформулированные в следующих тезисах:

- проектирование состава и размеров технологического оборудования, в том числе, автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП), необходимых для различных сценариев, режимов работы, погодных условий, климатических зон и графиков потребления энергии;
- анализ устойчивости электроснабжения, заключающийся в оценке способности системы энергообеспечения сохранять балансовую надежность как в условиях прерывистого характера генерации от ВИЭ, так и при возмущениях мощности потребления энергии;
- оптимальное управление электроснабжением с целью улучшения технико-экономических показателей;
- обоснование безопасности проектируемой микроэлектростанции.

**Концептуальная модель системы
электроснабжения****Структура проекта модели.**

В основе имитационного моделирования лежит методология системного анализа, что позволяет приме-

нять принципы системного подхода для исследования проектируемого автономного электроснабжения [15]. Проект модели предусматривает дальнейшее расширение ее области применения и повышение степени детализации процессов, выбираемые с учетом целей управления, ограничений и исходных данных.

В настоящей работе на этапе разработки простой исходной модели под целевым управлением понимается организация и координация подсистем таким образом, чтобы гарантировать балансовую надежность энергоснабжения потребителя. Анализ баланса следует проводить с циклом не менее одного календарного года, поскольку генерация и потребление энергии зависят от сезонов, меняющихся по годовому циклу. При этом, изучаемый этап детализации не отражает неравномерности переходных режимов оборудования, а именно: динамику выхода на установившийся режим работы электролизера и ТЭ. Данный подход предполагает, что результирующий годовой баланс определяется, в основном, установившимися режимами работы оборудования, переходы между которыми рассматриваются как квазистационарные.

Потоки электрической мощности и газообразного водорода, определяющие балансировку мощности в системе, а также выделение подсистем объекта управления, отражены на структурной схеме рис. 2.

Использование гибридного накопителя повышает надежность и устойчивость электроснабжения, поскольку две используемые технологии аккумулирования энергии обладают взаимно дополняющими динамическими, мощностными и емкостными характеристиками, что придает гибкость системе управления. Литий-ионная АБ имеет сравнительно небольшую емкость, подходящую для кратковременного действия, но при этом обладает быстрым откликом на резкие изменения генерации или потребления электроэнергии, например, в случае краткосрочного затенения солнечных панелей облаками или включения/отключения потребителей в сеть нагрузки. Водородному хранилищу вместе с ТЭ, напротив, присуща большая емкость и инерционность, поэтому ТЭ больше подходит для выработки длительного действия. Следовательно, при

отсутствии солнечной генерации дневной минимум целесообразно покрывать за счет ТЭ, а максимумы потребления вырабатывать с помощью АБ. Таким образом, проектируемая АСУТП должна обеспечивать надежность электроснабжения.

4.2. Исходные данные.

В качестве репрезентативных исходных данных по интенсивности солнечного излучения и температуре взяты данные с усреднением по часу за 2021 г. по городу Москве [16], поскольку в этом регионе запланирована реализация проекта опытной микроЭлектростанции.

Типовой суточный график нагрузки имеет явно выраженные характерные экстремумы и периоды: утренний и вечерний максимумы, зону снижения нагрузки днем и ночной провал нагрузки [17]. В качестве исходных данных (в первом приближении) использован упрощенный график суточной нагрузки (рис. 3). Исходя из геометрии усредненных суточных профилей солнечной и ветровой генерации, можно сделать вывод о том, что «П»-образный график задаваемой нагрузки целесообразно покрывать за счет солнечной, а базовую нагрузку графика нагрузки — за счет ветровой генерации. Таким образом, в рамках настоящей работы, где солнечная генерация является единственным первичным источником энергии, использован упрощенный вид графика нагрузки — «П»-образный, но без его базовой составляющей.

Программная реализация модели

Моделирование выполнено в Simulink с использованием библиотеки мультифизического моделирования Simscape, позволяющей проводить численные расчеты в сосредоточенных параметрах по принципиальной схеме на основе законов сохранения, дифференциальных и разностных уравнений. ИМ представляет собой расчетную схему с логико-математическим описанием, сформированную с помощью программного средства Simulink, где уставкой служит задаваемый график нагрузки, покрываемый как путем прямого преобразования солнечной генерации, так и за счет накопителей внутри системы.

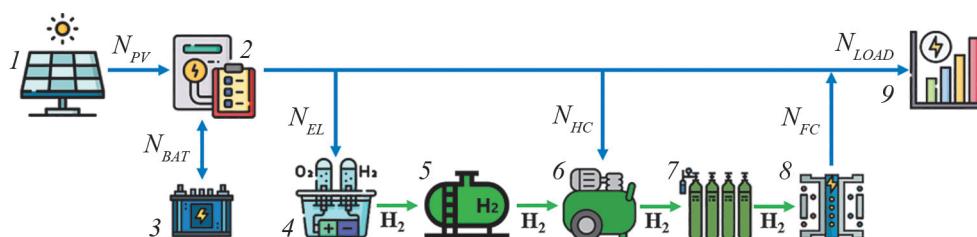


Рис. 2. Структурная идентификация объекта управления:

1 — фотоэлектрические панели; 2 — многофункциональный солнечный инвертор; 3 — АБ; 4 — электролизер; 5 — ресивер; 6 — водородный компрессор; 7 — газовые баллоны; 8 — водородный ТЭ; 9 — электрическая нагрузка; N_{PV} — мощность, генерируемая ФЭ блоками; N_{BAT} — мощность заряда/разряда АБ; N_{EL} — электрическая мощность, потребляемая электролизером; N_{HC} — мощность компрессора; N_{FC} — мощность, вырабатываемая ТЭ; N_{LOAD} — мощность потребления

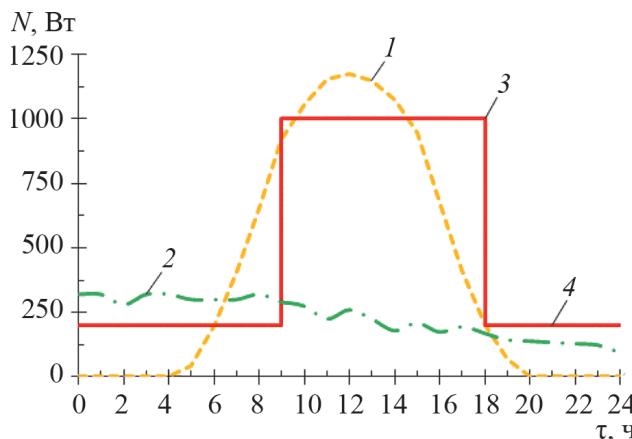


Рис. 3. Декомпозиция структуры солнечно-ветровой когенерации для покрытия упрощенного графика нагрузки:

1 — характеристический профиль ФЭ генерации; 2 — характеристический усредненный профиль ветровой генерации; 3 — «П»-образная часть графика нагрузки; 4 — базовая часть нагрузки

Исходные данные модели — сведения о погоде и графике нагрузки. Входными и выходными параметрами подсистемы выступает информация о технических характеристиках, указанных в паспортных данных на оборудование (см. таблицу). Через подсистемы проходят линии электрической мощности (постоянного тока/среднего значения переменного тока), а также газовый канал, посредством которых происходит обмен потоками энергии между подсистемами. Направления потоков мощности регулируются логическими и непрерывными сигналами управления. Подсистемы имеют диагностические выходы для измерения потребления и выработки электроэнергии, а также термодинамических параметров состояния газа (рис. 4).

Simscape служит для моделирования части подсистем, а именно газовой водородной системы, АБ, а так-

же для эквивалентных электрических. Это позволяет, с одной стороны, улучшить адекватность балансовой модели, с другой — повышает эффективность ее разработки.

Описание частных подсистем модели

Солнечная фотоэлектрическая установка.

В состав проектируемой солнечной установки входят (см. рис. 1): два ФЭ блока 1 по 4 кВт, состоящие из семи последовательно соединенных монокристаллических ФЭ солнечных модуля номинальной мощностью 540 Вт; однофазный многофункциональный солнечный инвертор 2 мощностью 8 кВт (кратковременно до 16 кВт) с двумя контроллерами точки максимальной мощности (TMM) и встроенным зарядным устройством для АБ; АБ 3, состоящая из четырех последовательно соединенных литий-ионных аккумуляторов с номинальным напряжением 12 В и емкостью 200 А·ч.

Модель вольт-амперной характеристики (ВАХ) ФЭ блоков выполнена с помощью хорошо себя зарекомендовавшей модели, интегрированной в библиотеку Electrical Simscape [18, 19], полностью воспроизводящей ВАХ паспортных данных на ФЭ солнечный модуль.

Модель регулирования контроллера ТММ не является целью настоящей работы и не представляет интереса для исследования. Для моделирования взяты паспортные данные на солнечную панель, построена зависимость ТММ от интенсивности солнечного излучения и температуры, а затем эти данные используются в подсистеме, имитирующей работу контроллера ТММ. Таким образом, входными параметрами для подсистемы, имитирующей ФЭ установку, выступают исходные данные о погоде (интенсивность солнечного излучения I_r и температура T), а выходным — максимальная электрическая мощность, генерируемая солнечными панелями in_N_PV (рис. 5).

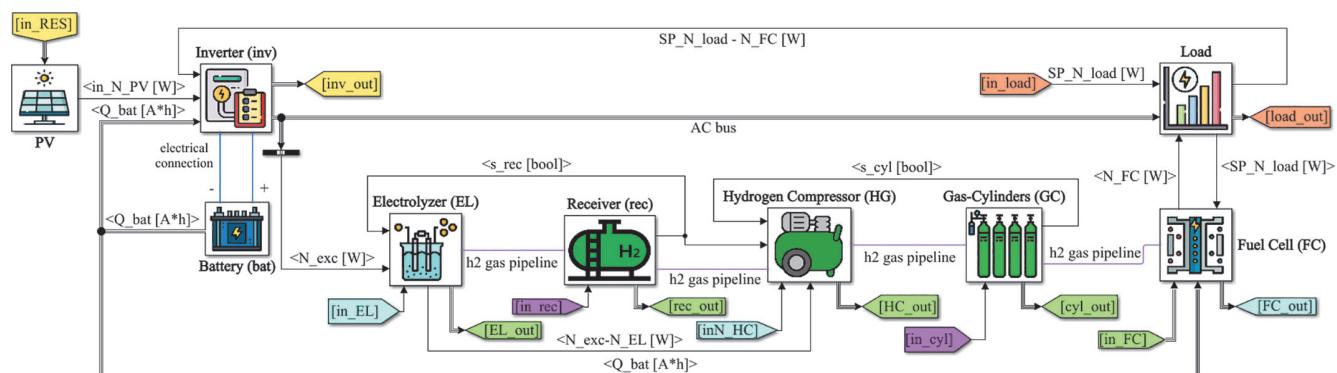


Рис. 4. Расчетная модель:

in_RES , in_load — исходные данные; PV — солнечные панели; $Inverter (inv)$ — многофункциональный солнечный инвертор; $Battery (bat)$ — АБ; $Electrolyzer (EL)$ — электролизер; $Receiver (rec)$ — ресивер; $Hydrogen Compressor (HG)$ — водородный компрессор; $Gas-Cylinders (cyl)$ — газовые баллоны; $Fuel Cell (FC)$ — водородный ТЭ; $Load$ — электрическая нагрузка; s — логическая переменная, $boolean$; N — электрическая мощность, ВА/Вт/кВт; Q — емкость, А·ч; RES — данные по температуре, $^{\circ}\text{C}$ и интенсивности солнечного излучения, $(\text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2)$; $h2$ gas pipeline — газовая система с водородом; $AC bus$ — шина переменного однофазного тока; in , out — входные и выходные параметры

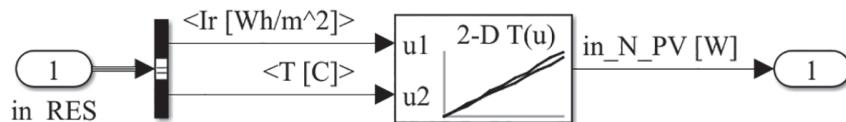


Рис. 5. Подсистема Simulink PV, моделирующая ФЭ генерацию

Аккумуляторная батарея.

Литий-ионные накопители в течение непродолжительного времени способны обеспечивать поглощение и отдачу достаточно высокой электрической мощности, при этом обладают саморазрядом и ограниченным сроком службы. Литий-ионные аккумуляторы целесообразно использовать для компенсации колебаний мощности в краткосрочный период, а также для срезания/смещения пиков нагрузки в присутствие дополнительного внешнего (солнечной генерации) или внутреннего источника питания (вторичной генерации ТЭ).

Модель ВАХ литий-ионного аккумулятора выполнена на основе известной эквивалентной электрической схемы, интегрированной в библиотеку Electrical Simscape Simulink [20], благодаря которой была построена зависимость динамики разряда от степени заряженности батареи, соответствующая данным, указанным в спецификации на аккумулятор.

Электрическая мощность разряда батареи на нагрузку регулируется уставкой по требуемой нагрузке, для этого на основе законов Ома реализована эквивалентная электрическая схема, имитирующая заряд аккумулятора в случае избытка генерации (рис. 6). Таким образом, входным параметром подсистемы АБ вы-

ступает значение избыточной или недостаточной для покрытия спроса электрической мощности, а выходным — электрическая мощность разряда АБ на нагрузку.

Баланс мощности регулируется следующим образом (рис. 7): когда ФЭ генерации I недостаточно для покрытия нагрузки 3 , остаточный спрос на энергию компенсируется посредством солнечного инвертора за счет электроэнергии, запасенной в АБ 2 . Таким образом, площади под графиками 1 (покрытие части нагрузки за счет ФЭ панелей) и 2 (покрытие части нагрузки за счет АБ) в сумме дают потребление электроэнергии нагрузкой 3 .

Электролизер.

Он необходим для преобразования методом электролиза воды излишков произведенной электроэнергии от ВИЭ в химическую энергию, запасаемую в газообразном водороде. Применение электролизеров на основе твердого полимерного электролита (ТПЭ) обусловлено рядом преимуществ, способствующих их интеграции с возобновляемыми источниками энергии [21].

Построение подсистемы электролизера опирается на технические характеристики коммерческого электролизера с ТПЭ (см. таблицу), состоящего из электрохимических ячеек, объединенных в стек. ИМ газовой системы с водородом и, в частности, газовая система

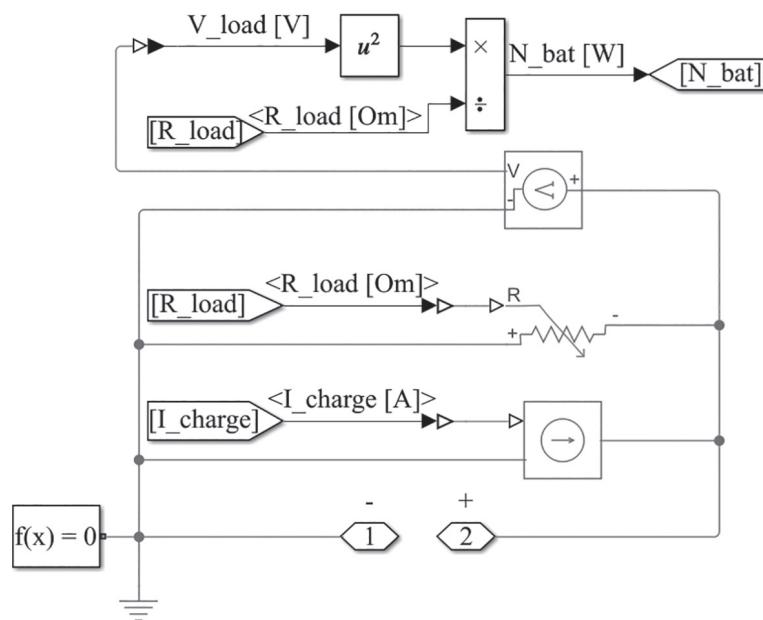


Рис. 6. Эквивалентная схема, по которой осуществляется заряд АБ и регулируется мощность разряда АБ на нагрузку:

N_{BAT} — мощность разряда, Вт; R_{load} — регулируемое сопротивление нагрузки, значение которого зависит от спроса на электроэнергию, Ом; I_{charge} — регулируемый ток заряда в зависимости от значения избыточной энергии и уровня заряда АБ

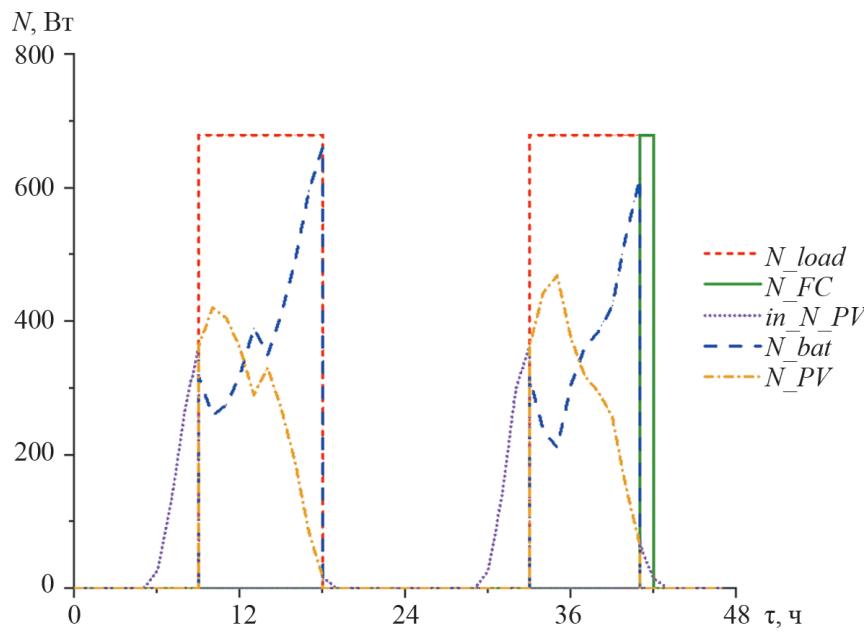


Рис. 7. Регулирование баланса мощности 19 — 20 сентября 2021 г.:

1 — мощность, потребляемая нагрузкой за счет ФЭ генерации; 2 — мощность, потребляемая нагрузкой за счет АБ; 3 — график нагрузки; 4 — мощность, поглощаемая АБ при зарядке; 5 — мощность, потребляемая нагрузкой за счет выработки ТЭ

электролизной установки выполнены с использованием библиотеки Gas Simscape пакета Matlab Simulink (рис. 8), где были применены функциональные блоки Gas Properties (G) [22] и Controlled Mass Flow Rate Source (G) [23], более подробное описание термодинамических процессов в которых дано в [21, 24].

На вход электролизера подаются сигналы управления и внутренние параметры, определяемые характеристиками электролизера (см. рис. 8). Логический сигнал управления s_{rec} по обратной связи оповещает о необходимости включения/отключения электролизера в зависимости от наполненности ресивера водородом. По непрерывному сигналу на вход подсистемы приходит значение свободной электрической мощности в

системе N_{exc} . Зависимость производительности водорода $G(H_2)_{EL}$, являющаяся выходным параметром подсистемы, от потребляемой мощности N_{exc} в установленном режиме работы по паспортным данным имеет линейную зависимость.

Система хранения водорода.

Водородный накопитель предназначен для хранения электрической энергии, произведенной за счет неиспользуемой ФЭ генерации, с возможностью последующего преобразования ее обратно в электроэнергию внутри системы в период низкой первичной генерации. Водород может храниться в газообразном, жидким и связанном состоянии в носителях и в форме химических соединений.

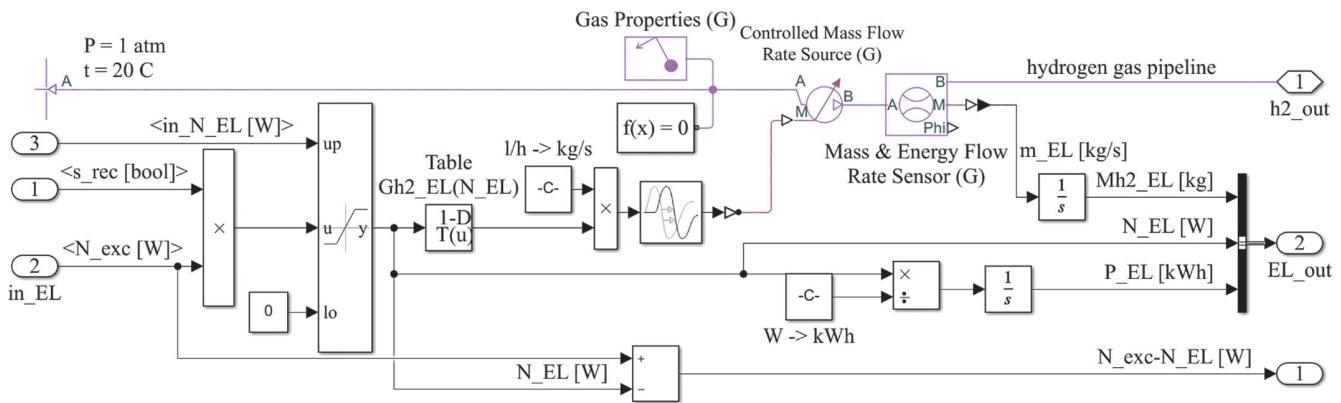


Рис. 8. Подсистема Sumulink Electolyzer (EL) электролизной установки:

Table $Gh2_EL(N_EL)$ — табличные данные зависимости расхода генерируемого водорода в электролизере $Gh2_EL$ от электрической мощности, подаваемой на электролизер N_EL

К наиболее отработанному, доступному способу относят хранение водорода в сжатом газе. Эта технология аналогична хранению природного газа, и ее применение целесообразно для проектируемой микроэлектростанции, исходя из масштабов потребления, стоимости и простоты реализации.

Моделируемая система водородного накопления энергии состоит из трех основных элементов (см. рис. 4): Receiver (rec) — ресивера, обеспечивающего хранение водорода при повышенных рабочих давлениях до 5 атм; Hydrogen Compressor (HG) — водородного компрессора; Gas-Cylinders (GC) — стандартных газовых баллонов для долгосрочного хранения компримированного водорода под давлением до 200 атм.

Ресивер выступает резервуаром перед компрессором, в который из электролизера накапливается рабочая среда (водород), для сокращения его циклов включения/выключения и стабилизации подачи водорода в периоды пиковых мощностей.

Газообразный водород при нормальных условиях имеет низкую плотность, поэтому для долгосрочного хранения газ компримируют. Чем выше конечное давление газа, тем меньше общий объем резервуаров понадобится для его хранения.

С целью компримирования водорода выбран водородный компрессор отечественного производства с минимальными характеристиками по производительности (см. таблицу). Выбор происходит с учетом того, что производительность компрессора будет регулироваться посредством частотного преобразователя. При неравномерной генерации от ВИЭ компрессор с частотным приводом обеспечивает высокую энергоэффективность за счет использования всей доступной избыточной электрической мощности, кроме этого повышается надежность его рабо-

ты, обусловленная уменьшением количества циклов пуска/останова.

Моделирование водородного аккумулирования энергии выполнено с использованием газовых и тепловых портов [25, 26], имитирующих накопление массы и энергии в газовой сети, а также теплообмена с окружающей средой (рис. 9). Внутреннее давление и температура меняются с течением времени в зависимости от сжимаемости и теплоемкости газа. В основе используемых функциональных блоков лежат расчетные уравнения сохранения массы, баланса энергии, а также частные производные массы и энергии по температуре и давлению.

Таким образом, входными параметрами моделей ресивера и газовых баллонов выступают T и in_h2 — температура окружающей среды и массовый поток водорода на входе в резервуар. Выходными параметрами ИМ ресивера и газовых баллонов являются газовая линия водорода $h2_out$, s — логический сигнал, оповещающий о предельных значениях давлений в резервуарах, и диагностические выходы T , p — температура и давление водорода в резервуарах.

На вход компрессора подаются следующие параметры (рис. 10): логические сигналы о предельных значениях давления в ресивере s_rec и в баллонах s_cyl , свободная электрическая мощность, генерируемая ФЭ установкой N_exc-N_EL , а также верхнее рабочее значение электрической мощности компрессора inN_HC .

Выходными параметрами ИМ компрессора служат (см. рис. 10): газовая линия водорода $h2_out$, по которой поток водорода подается в подсистему, имитирующую баллоны, а также диагностические выходы N_HC , P_HC , P_los — соответственно, электрическая мощность компрессора, потребленная компрессором электроэнергия и остаточная электроэнергия, которая

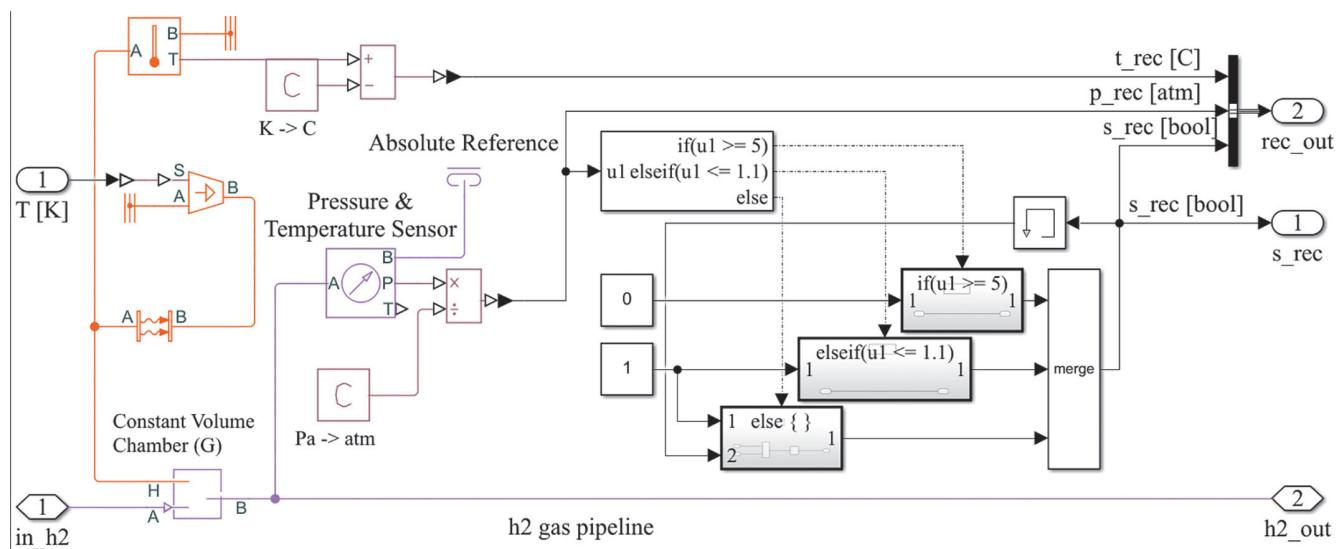


Рис. 9. Подсистема Simulink Reciever (rec), имитирующая работу ресивера

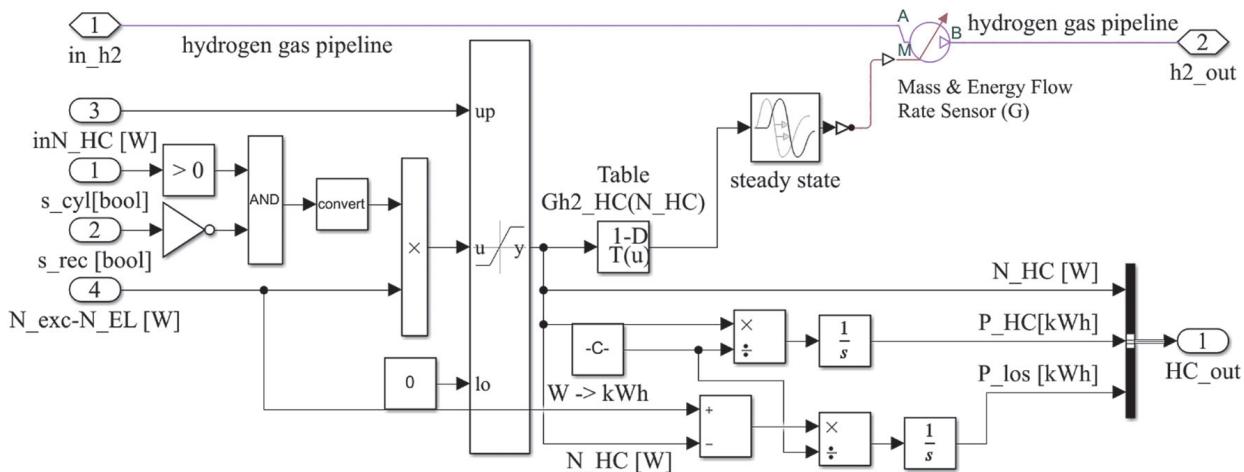


Рис. 10. Подсистема Simulink Hydrogen Compressor (HC), моделирующая водородный компрессор:

Table $Gh2_HC(N_HC)$ — табличные данные зависимости расхода водорода, проходящего через компрессор $Gh2_HC$, от электрической мощности, подаваемой на компрессор N_HC (принята линейная зависимость)

теряется из-за отсутствия возможностей поглотить ее внутри системы.

Водородный топливный элемент.

Для электроснабжения потребителей малой и средней мощности (10...100 кВт) с высокими коэффициентом полезного действия и экологическими требованиями перспективными считаются энергоустановки на базе водородно-воздушных ТЭ.

Подсистема ТЭ имитирует выходную электрическую мощность P_{FC} в зависимости от заданной уставки для топливного элемента и воспроизводит расход водорода на входе в подсистему in_h2 (рис. 11).

Когда батарея разряжается до 20% своей емкости, включается топливный элемент (см. рис. 7), чтобы избежать полного разряда батареи.

Результаты вычислительного эксперимента и их интерпретация

Результаты симулирования для давлений и температур водорода в хранилище (газовых баллонах) (рис. 12)

отражают изменение внутреннего давления и температуры водорода как вследствие теплообмена с окружающей средой, так и при компримировании/дренажировании газа в баллонах.

Балансировка мощности и потребление энергии (рис. 13) симулируется в течении 2021 г., где реализуется сценарий, когда ТЭ полностью отрабатывает нагрузку в течение четырех месяцев: января, февраля, ноября и декабря, а в остальное время происходит подстраховка АБ от полного разряда.

P_{los} — потери, возникающие вследствие того, что оборудование водородного аккумулирования не предусматривает параллельную работу [27], т. е. в случае, когда ресивер заполнен, компрессор не может сжимать водород в баллоны, поскольку водород от общего для баллонов коллектора поступает в ТЭ.

Показателем эффективности энергоиспользования выступает отношение поставленной потребителям электрической энергии к выработанной в этих целях из солнечной микрогенерации (рис. 14), где его значение ограничено величиной 100%, поскольку в первые зим-

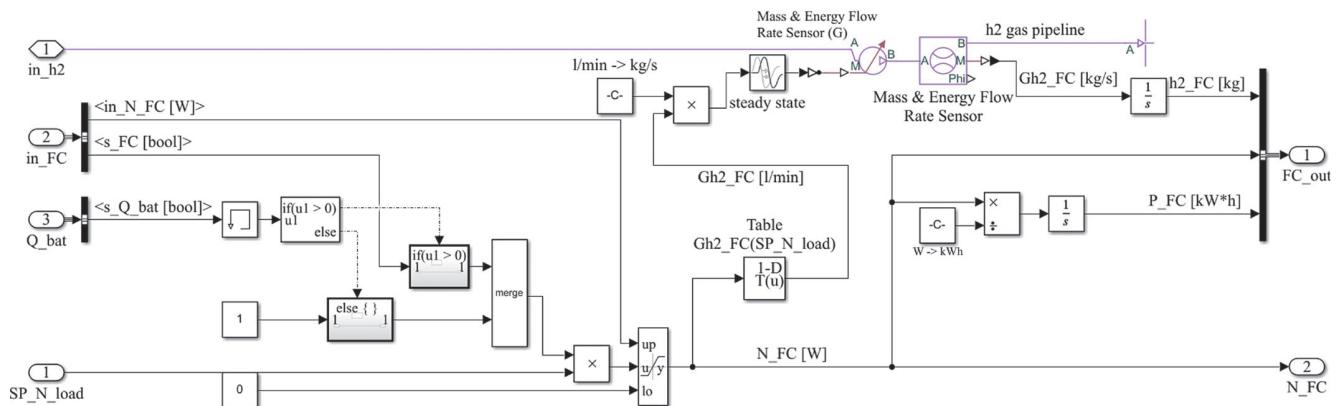


Рис. 11. Подсистема Simulink Fuel Cell (FC), моделирующая ТЭ

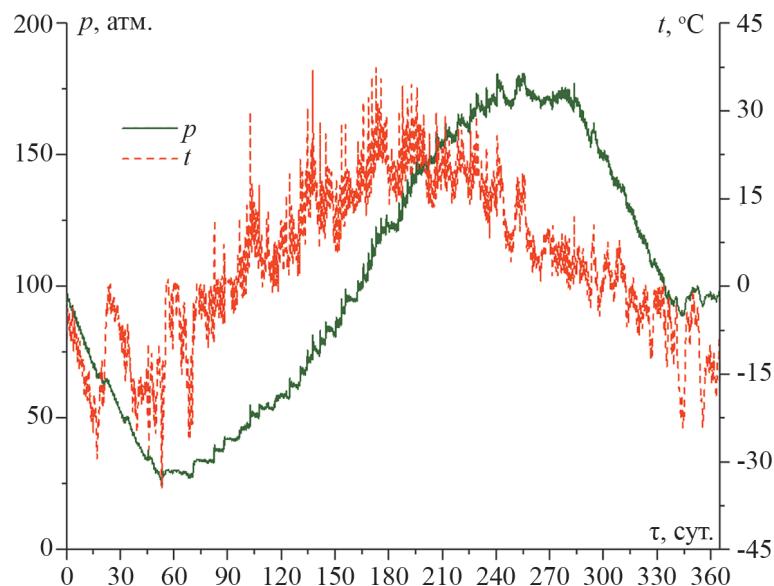


Рис. 12. Динамика изменения давления и температуры водорода в газовых баллонах в течение 2021 г.

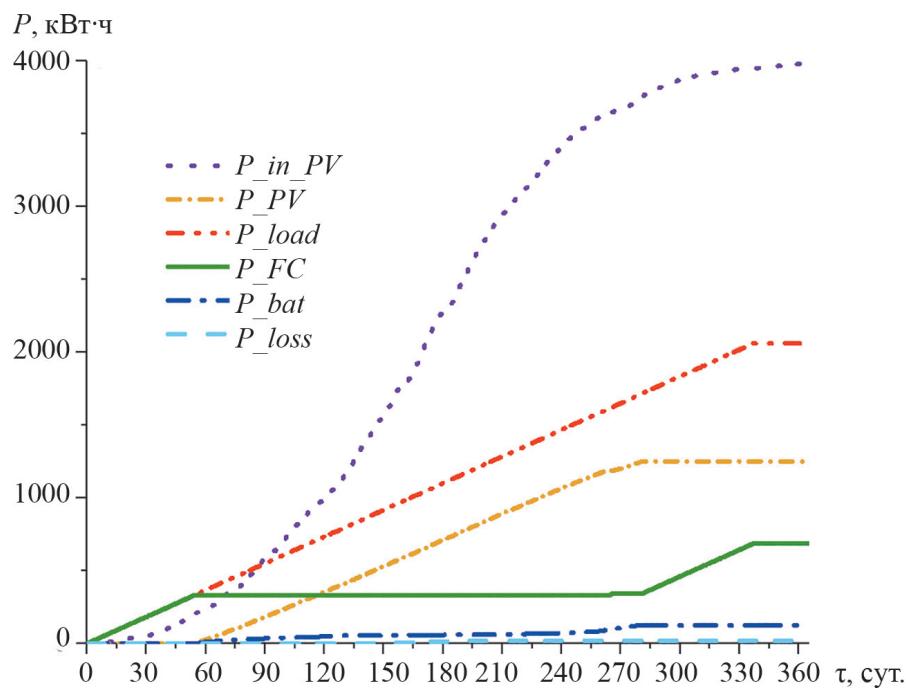


Рис. 13. Потребление электроэнергии по данным 2021 г.:

P_{FC} — потребление за счет выработки ТЭ; P_{PV} — потребление за счет ФЭ генерации; P_{bat} — потребление за счет АБ; in_P_{PV} — генерируемая электроэнергия; P_{load} — потребление электроэнергии нагрузкой; P_{los} — потери свободной генерируемой электроэнергии

ние месяцы, по данным за 2021 г., покрытие нагрузки осуществлялось в основном ТЭ за счет начального количества водорода в хранилище (см. рис. 12).

Заключение

Разработана балансовая модель автономной микроэлектростанции номинальной мощностью 8 кВт с первичной ФЭ генерацией и водородным аккуму-

лированием энергии, управляющая система которой обеспечивает согласованную работу созданных подсистем, имитирующих работу элементов оборудования.

Результаты симулирования предложенного состава оборудования микроэлектростанции демонстрируют, что для надежного покрытия задаваемого в работе графика нагрузки в течение всего календарного года,

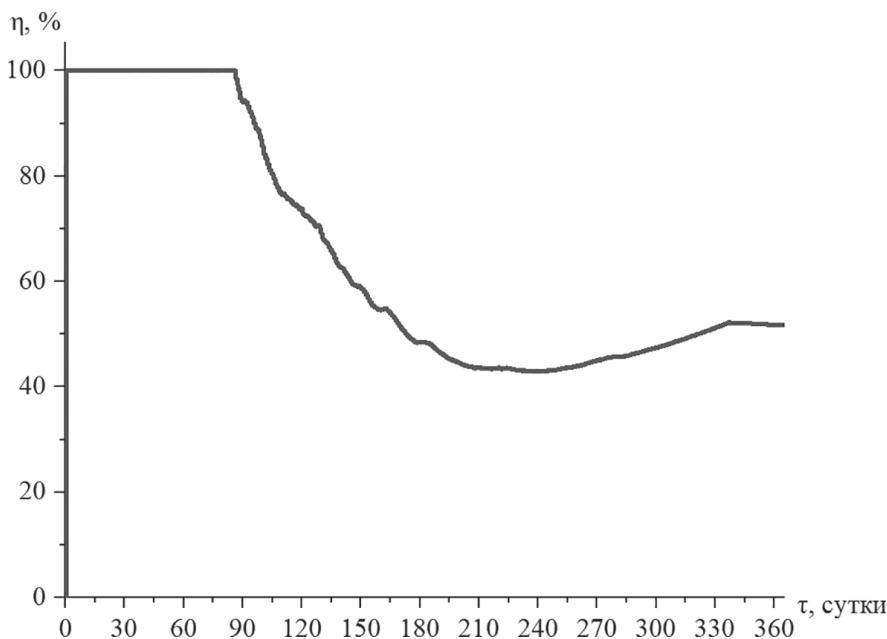


Рис. 14. Коэффициент использования мощности в течении 2021 г.

необходимы ресивер объемом 3 м³ и 60 стандартных газовых баллонов объемом 50 л.

Использование разработанной модели показало, что эффективность использования энергии за представленный период в один календарный год составила около 55%.

Литература

1. Kreps B.H. The Rising Costs of Fossil-fuel Extraction: an Energy Crisis that Will Not Go Away // American J. Economics and Sociology. 2020. V. 79(3). Pp. 695—717.
2. Asif M., Muneer T. Energy Supply, Its Demand and Security Issues for Developed and Emerging Economies // Renewable and Sustainable Energy Rev. 2007. V. 11(7). Pp. 1388—1413.
3. Lamb W. F. e. a. A Review of Trends and Drivers of Greenhouse Gas Emissions by Sector from 1990 to 2018 // Environmental Research Lett. 2021. V. 16(7). P. 073005.
4. Falkner R. The Paris Agreement and the New Logic of International Climate Politics // Intern. Affairs. 2016. V. 92(5). Pp. 1107—1125.
5. Yakubson K.I. Prospects for Production and Use of Hydrogen as One of Directions of the Development of Low-carbon Economy in the Russian Federation // Russian J. Applied Chem. 2020. V. 93. Pp. 1775—1795.
6. Babatunde O.M., Munda J.L., Hamam Y. A Comprehensive State-of-the-art Survey on Power Generation Expansion Planning with Intermittent Renewable Energy Source and Energy Storage // Intern. J. Energy Research. 2019. V. 43(12). Pp. 6078—6107.
7. Bragg-Sitton S. M. e. a. Reimagining Future Energy Systems: Overview of the US Program to Maximize
- Наиболее актуальным применением ИМ могут стать: проектирование подобных микроэлектростанций, анализ устойчивости электроснабжения, оптимизация управления и обоснование безопасности при эксплуатации установок с водородным аккумулированием энергии в виде сжатого газа.
1. Kreps B.H. The Rising Costs of Fossil-fuel Extraction: an Energy Crisis that Will Not Go Away. American J. Economics and Sociology. 2020;79(3): 695—717.
2. Asif M., Muneer T. Energy Supply, Its Demand and Security Issues for Developed and Emerging Economies. Renewable and Sustainable Energy Rev. 2007;11(7):1388—1413.
3. Lamb W. F. e. a. A Review of Trends and Drivers of Greenhouse Gas Emissions by Sector from 1990 to 2018. Environmental Research Lett. 2021;16(7):073005.
4. Falkner R. The Paris Agreement and the New Logic of International Climate Politics. Intern. Affairs. 2016;92(5):1107—1125.
5. Yakubson K.I. Prospects for Production and Use of Hydrogen as One of Directions of the Development of Low-carbon Economy in the Russian Federation. Russian J. Applied Chem. 2020;93:1775—1795.
6. Babatunde O.M., Munda J.L., Hamam Y. A Comprehensive State-of-the-art Survey on Power Generation Expansion Planning with Intermittent Renewable Energy Source and Energy Storage. Intern. J. Energy Research. 2019;43(12):6078—6107.
7. Bragg-Sitton S. M. e. a. Reimagining Future Energy Systems: Overview of the US Program to Maximize

- Energy Utilization via Integrated Nuclear-renewable Energy Systems // Intern. J. Energy Research. 2020. V. 44(10). Pp. 8156—8169.
8. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 г. [Офиц. сайт] <http://static.government.ru/> (дата обращения 01.03.2023).
9. Dunikov D.O. Russia's View on Development of Novel and Renewable Energy Sources, Including Hydrogen Energy // Intern. J. Hydrogen Energy. 2015. V. 4(40). Pp. 2062—2063.
10. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации [Офиц. сайт] <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsexl.pdf> (дата обращения 01.03.2023).
11. Alam M. e. a. Renewable Sources Based DC Microgrid Using Hydrogen Energy Storage: Modelling and Experimental Analysis // Sustainable Energy Technol. and Assessments. 2020. V. 42. P. 100840.
12. Vivas F.J. e. a. Multi-objective Fuzzy Logic-based Energy Management System for Microgrids with Battery and Hydrogen Energy Storage System // Electronics. 2020. V. 9(7). P. 1074.
13. Dawood F., Shafiullah G.M., Anda M. Stand-alone Microgrid with 100% Renewable Energy: a Case Study with Hybrid Solar PV-battery-hydrogen // Sustainability. 2020. V. 12(5). P. 2047.
14. Möller M.C., Krauter S. Hybrid Energy System Model in Matlab/Simulink Based on Solar Energy, Lithium-ion Battery and Hydrogen // Energies. 2022. V. 15(6). P. 2201.
15. Павлов А.А. и др. О-75 Основы системного анализа и проектирования АСУ. Киев: Выща школа, 1991.
16. NACA. The Power Project <https://power.larc.nasa.gov/> [Электрон. ресурс] (дата обращения 15.07.2022).
17. Шведов Г.В., Шестопалова Т.А. Системы электроснабжения. М.: Изд-во МЭИ, 2018.
18. PV Array MATLAB Documentation [Электрон. ресурс] <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pvarray.html> (дата обращения 01.12.2022).
19. Bellini A. e. a. Simplified Model of a Photovoltaic Module // Proc. Appl. Electronic. 2009. Pp. 47—51.
20. Battery MATLAB Documentation [Электрон. ресурс] https://www.mathworks.com/help/sps/ref/battery.html?searchHighlight=battery&s_tid=srchtitle_battery_2 (дата обращения 27.08.2022).
21. Кулешов Н.В. и др. Водородная энергетика. М.: Изд-во МЭИ, 2021.
22. Gas Properties MATLAB Documentation [Электрон. ресурс] https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/gaspropertiesg.html?s_tid=doc_ta (дата обращения 09.05.2022).
23. Controlled Mass Flow Rate Source MATLAB Documentation [Электрон. ресурс] <https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/controlledmassflowrate-sourceg.html> (дата обращения 01.05.2022).
24. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Энергия, 1974.
- Energy Utilization via Integrated Nuclear-renewable Energy Systems. Intern. J. Energy Research. 2020;44(10): 8156—8169.
8. Energeticheskaya Strategiya Rossiyskoy Federatsii na Period do 2035 g. [Ofits. Sayt] <http://static.government.ru/> (Data Obrashcheniya 01.03.2023). (in Russian).
9. Dunikov D.O. Russia's View on Development of Novel and Renewable Energy Sources, Including Hydrogen Energy // Intern. J. Hydrogen Energy. 2015;4(40): 2062—2063.
10. Kontsepsiya Razvitiya Vodorodnoy Energetiki v Rossiyskoy Federatsii [Ofits. Sayt] <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsexl.pdf> (Data Obrashcheniya 01.03.2023). (in Russian).
11. Alam M. e. a. Renewable Sources Based DC Microgrid Using Hydrogen Energy Storage: Modelling and Experimental Analysis. Sustainable Energy Technol. and Assessments. 2020;42:100840.
12. Vivas F.J. e. a. Multi-objective Fuzzy Logic-based Energy Management System for Microgrids with Battery and Hydrogen Energy Storage System. Electronics. 2020;9(7):1074.
13. Dawood F., Shafiullah G.M., Anda M. Stand-alone Microgrid with 100% Renewable Energy: a Case Study with Hybrid Solar PV-battery-hydrogen. Sustainability. 2020;12(5):2047.
14. Möller M.C., Krauter S. Hybrid Energy System Model in Matlab/Simulink Based on Solar Energy, Lithium-ion Battery and Hydrogen. Energies. 2022; 15(6):2201.
15. Pavlov A.A. i dr. O-75 Osnovy Sistemnogo Analiza i Proektirovaniya ASU. Kiev: Vyshcha Shkola, 1991. (in Russian).
16. NACA. The Power Project <https://power.larc.nasa.gov/> [Elektron. Resurs] (Data Obrashcheniya 15.07.2022).
17. Shvedov G.V., Shestopalova T.A. Sistemy Elektrosnabzheniya. M.: Izd-vo MEI, 2018. (in Russian).
18. PV Array MATLAB Documentation [Elektron. Resurs] <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pvarray.html> (Data Obrashcheniya 01.12.2022).
19. Bellini A. e. a. Simplified Model of a Photovoltaic Module. Proc. Appl. Electronic. 2009:47—51.
20. Battery MATLAB Documentation [Elektron. Resurs] https://www.mathworks.com/help/sps/ref/battery.html?searchHighlight=battery&s_tid=srchtitle_battery_2 (Data Obrashcheniya 27.08.2022).
21. Kuleshov N.V. i dr. Vodorodnaya Energetika. M.: Izd-vo MEI, 2021. (in Russian).
22. Gas Properties MATLAB Documentation [Elektron. Resurs] https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/gaspropertiesg.html?s_tid=doc_ta (Data Obrashcheniya 09.05.2022).
23. Controlled Mass Flow Rate Source MATLAB Documentation [Elektron. Resurs] <https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/controlledmassflowrate-sourceg.html> (Data Obrashcheniya 01.05.2022).
24. Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheyndl A.E. Tekhnicheskaya Termodinamika. M.: Energiya, 1974. (in Russian).

25. **Constant Volume Chamber** MATLAB Documentation [Электрон. ресурс] https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/constantvolumechamberg.html?s_tid=doc_ta (дата обращения 01.05.2022).
26. **Convective Heat Transfer** MATLAB Documentation [Электрон. ресурс] https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/convectiveheattransfer.html?s_tid=doc_ta (дата обращения 04.11.2022).
27. **Молотов И.М. и др.** Моделирование технологического процесса водородного аккумулирования энергии // Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 8. С. 15—21.
25. **Constant Volume Chamber** MATLAB Documentation [Elektron. Resurs] https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/constantvolumechamberg.html?s_tid=doc_ta (Data Obrashcheniya 01.05.2022).
26. **Convective Heat Transfer** MATLAB Documentation [Elektron. Resurs] https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/convectiveheattransfer.html?s_tid=doc_ta (Data Obrashcheniya 04.11.2022).
27. **Molotov I.M. i dr.** Modelirovaniye Tekhnologicheskogo Protsessa Vodorodnogo Akkumulirovaniya Energii. Matematicheskie Metody v Tekhnologiyakh i Tekhnike;2022;8:15—21. (in Russian).

Сведения об авторах:

Молотов Иван Михайлович — аспирант кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами НИУ «МЭИ», младший научный сотрудник Объединенного института высоких температур РАН, научный сотрудник Научно-технического центра по ядерной и радиационной безопасности, e-mail: MolotovIM@mpei.ru

Счастливцев Алексей Иванович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Объединенного института высоких температур РАН, e-mail: h2lab@mail.ru

Дуников Дмитрий Олегович — кандидат технических наук, доцент кафедры общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ», заведующий лабораторией Объединенного института высоких температур РАН, e-mail: DunikovDO@mpei.ru

Масленникова Мария Романовна — магистрант кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами НИУ «МЭИ», e-mail: MaslennikovaMR@mpei.ru

Мезин Сергей Витальевич — кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами НИУ «МЭИ», e-mail: MezinSV@mpei.ru

Проталинский Олег Мирославович — доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами НИУ «МЭИ», e-mail: ProtalinskyOM@mpei.ru

Information about authors:

Molotov Ivan M. — Ph.D.-student of Automated Control Systems for Thermal Processes Dept., NRU MPEI, Junior Research Assistant of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Research Assistant of Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, e-mail: MolotovIM@mpei.ru

Schastlivtsev Aleksey I. — Ph.D. (Techn.), Senior Researcher of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, e-mail: h2lab@mail.ru

Dunikov Dmitriy O. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of General Physics and Nuclear Fusion Dept., NRU MPEI, Head of the Laboratory, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, e-mail: DunikovDO@mpei.ru

Maslennikova Mariya R. — Master's Student of Automated Control Systems for Thermal Processes Dept., NRU MPEI, e-mail: MaslennikovaMR@mpei.ru

Mezin Sergey V. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Automated Control Systems for Thermal Processes Dept., NRU MPEI, e-mail: MezinSV@mpei.ru

Protalinsky Oleg M. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Automated Control Systems for Thermal Processes Dept., NRU MPEI, e-mail: ProtalinskyOM@mpei.ru

Работа выполнена в рамках проекта «Имитационное моделирование электростанции на основе возобновляемых источников энергии с водородно-воздушным аккумулированием энергии» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2022 — 2024 гг.

The work is executed within the Framework of the Project «Simulation Modeling of a Power Plant Based on Renewable Energy Sources with Hydrogen-air Energy Storage» with the Support of a Grant from the National Research University «MPEI» for the Implementation of the Research Program «Priority 2030: Technologies of the Future» in 2022 — 2024.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 29.03.2023

The article received to the editor: 29.03.2023

Статья принята к публикации: 06.06.2023

The article has been accepted for publication: 06.06.2023