

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФОТОДИЗЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ В MATLAB/SIMULINK

Рассмотрена имитационная модель автономной фотодизельной системы электроснабжения (ФДЭС) на постоянном токе. Модель ФДЭС, реализованная в блочном приложении Simulink программного комплекса Matlab, содержит: фотоэлектрическую станцию (ФЭС), дизель-генераторную установку (ДГУ), систему накопления электрической энергии (СНЭЭ), децентрализованный потребитель, а также вспомогательные преобразовательные устройства. ФДЭС-модель позволяет производить анализ энергетического баланса между генерацией, потреблением и доступным энергетическим обменом от СНЭЭ в сопряжении на шине постоянного тока (ШПТ). С помощью предлагаемой модели возможен анализ и оптимизация технико-экономических показателей ФДЭС на постоянном токе с приоритетом генерации ФЭС, что обеспечивает: уменьшение потребления дизельного топлива и карбонизации воздуха, снижение стоимости 1 кВт·ч электроэнергии для децентрализованного потребителя, разработку алгоритмов интеллектуального управления составом и режимами электротехнического комплекса. Полученные технико-экономические показатели ФДЭС на постоянном токе превосходят аналогичные системы на переменном токе за счет возможности увеличения вклада ФЭС в энергетический баланс автономной системы электроснабжения. В результате численных экспериментов с изменяющимися входными условиями: годовыми изменениями инсоляции и температуры на различных широтах, авторами обоснованы технические, экономические, экологические критерии эффективности принятия решений и рекомендации по проектированию и эксплуатации ФДЭС на постоянном токе. Разработаны интеллектуальные алгоритмы эффективного управления ФДЭС на постоянном токе.

Ключевые слова: фотодизельные системы электроснабжения, системы постоянного тока, фотоэлектрические станции, системы накопления электрической энергии, возобновляемые источники энергии, интеллектуальное управление.

Введение. Тренд на «энергетический переход» [1] и интеллектуальное управление электроэнергетическими системами (ЭЭС) сегодня весьма актуален, так как создание устойчивой к внешнеэкономическим возмущающим факторам отрасли — приоритетная задача для стран-лидеров энергетического сектора. Примером подобного негативного воздействия является сокращение глобального потребления электроэнергии на 3,8 % в 2020 году из-за мировой пандемии COVID-19. Данное снижение является прецедентным в мировой истории, где последствия Второй мировой войны и мирового финансового экономического кризиса 2008 года значительно ниже [2].

Другой мировой проблемой энергетики является корреляция неизбежно возрастающего уровня потребления электроэнергии с выбросами углекислого газа в атмосферу [3]. Именно эти глобальные проблемы вызывают активные дискуссии по управлению энергетической безопасности многих государств.

Кроме классической в своём понимании ЭЭС, существует так называемая малая энергетика — автономные ЭЭС. По данным Минэнерго России из 50 тыс. электростанций, находящихся на территории Российской Федерации, 49 тыс. относятся к объектам автономных ЭЭС. Их суммарная установленная мощность равна 17 ГВт, а годовая выработка электроэнергии составляет 50 млрд кВт·ч. [4].

Основной генерирующей установкой автономной ЭЭС является дизель-генераторная установка (ДГУ). Такой способ производства электроэнергии применяется в децентрализованных районах, где отсутствует возможность подключения потребителей к централизованной системе электроснабжения. Как правило, установленная мощность децентрализованных потребителей невелика и составляет десятки — сотни кВт.

В настоящее время, для улучшения технико-экономических показателей автономных дизельных ЭЭС, в их состав интегрируют установки возобновляемой энергетики. Полученные гибридные системы электроснабжения являются технически стабильными, а также экономически обоснованными. Однако они адаптированы под определённый алгоритм работы, ограничивающий возможности расширения их функционала и наращивания мощностей за счёт увеличения доли возобновляемого энергоносителя [5]. Такая ситуация обусловлена тем, что параметры генерируемой электроэнергии установками возобновляемой энергетики существенно различаются по основным техническим показателям: род тока, частота и величина выходного напряжения. Соответственно, это вносит ряд ограничений в режим работы установок возобновляемой энергетики, связанных с автономной системой электроснабжения через сетевые инверторы [6].

Исходя из последних научных исследований, опыта эксплуатации, а также формирующейся правовой платформы отечественных и активно эксплуатируемых зарубежных гибридных объектов малой энергетики [7–9], авторы прогнозируют развитие автономных ФДЭС на постоянном токе. Отличительной особенностью подобных ФДЭС на постоянном токе должны стать адаптивные алгоритмы интеллектуального управления режимами взаимодействия генерирующих и аккумулирующих энергообъектов в зависимости от их внутреннего состояния, внешних условий и уровня электропотребления. Оценка эффекта от внедрения интеллектуальных алгоритмов должна основываться на существенном снижении выработки электроэнергии ДЭС в пользу источников возобновляемой энергии (ВИЭ). Вследствие этого наиболее значимым системным экономическим эффектом является снижение топливных издержек, а экологический эффект проявляется от снижения выбросов углекислых газов. Как заключают авторы работ [10–12], эффективность таких ФДЭС может быть обеспечена, во многом, благодаря эффективности энергопреобразований, современным средствам оптимизации состава энергетического оборудования и управления рассматриваемых автономных систем электроснабжения.

Таким образом, существующая потребность в увеличении объёмов производства электроэнергии путём интеллектуального развития ЭЭС и использования новых энергоисточников при снижении уровня вредных выбросов в атмосферу, а также уменьшения воздействия внешнеэкономических факторов на отрасль — актуальная проблема для инженерных исследований и научных изысканий. Основой для решения комплекса этих научно-технических задач может являться создание имитационных моделей гибридных ЭЭС с интеллектуальными алгоритмами управления генерирующими источниками в широко известных программных комплексах.

Анализ схемы фотодизельной системы электроснабжения на постоянном токе. В целях визуализации блочного состава ФДЭС на постоянном токе, описания функций, а также для обозначения энергетических, командных, информационных и других межблочных связей, представлена общая функциональная блок-схема структуры ФДЭС на постоянном токе для электроснабжения децентрализованного потребителя. Данная блок-схема позволяет упорядочить процесс осмысления и формулировки

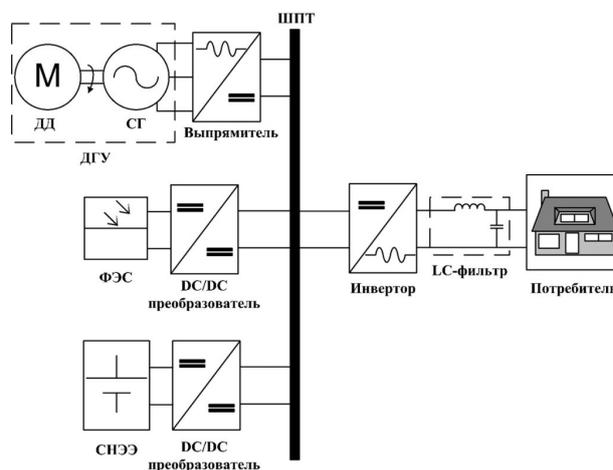


Рис. 1. Блок-схема фотодизельной системы электроснабжения на постоянном токе

требований к ФДЭС на постоянном токе. Блочная схема предлагаемой гибридной системы электроснабжения изображена на рис. 1.

Структура ФДЭС-модели на постоянном токе основана на реализации баланса мощности в автономной ФДЭС с учётом обеспечения энергоэффективного использования ДГУ и приоритетного использования ФЭС с помощью команд управляющей логики генерирующих установок. В состав ФДЭС-модели входят: ФЭС, ДГУ, СНЭЭ, децентрализованный потребитель, а также вспомогательные преобразовательные устройства. В качестве узла сопряжения выступает ШПТ, номинальное напряжение которой стабилизируется на уровне 500 В. Основные задачи для системы интеллектуального управления ФДЭС на постоянном токе можно сформулировать следующим образом:

1. Для ДГУ: стабилизация напряжения на ШПТ (обеспечение его работы в режиме источника напряжения), минимизация времени его работы, обеспечение рациональной загрузки.
2. Для ФЭС: отбор максимальной мощности от фотозлектрических модулей с учётом инсоляции и температуры с помощью МРРТ (от англ. Maximum Power Point Tracking — МРРТ) технологий, обеспечивающих работу ФЭС в режиме источника тока.
3. Для СНЭЭ: обеспечение контролируемых режимов заряда-разряда для оптимизации эксплуатационных характеристик аккумуляторов и режимов работы автономной энергосистемы.
4. Децентрализованный потребитель должен быть обеспечен бесперебойной подачей электроэнергии на переменном токе необходимого качества. Для этого в модели используется гибридный инвертор напряжения с фильтром.

Исходя из сформулированных задач для каждого из компонентов ФДЭС-модели, для максимально полного использования ресурсов возобновляемого энергоносителя, при оптимальных режимах энергетического оборудования и, соответственно, минимальной себестоимости генерируемой электроэнергии, в модели логично использовать центральный контроллер. Контроллер должен обеспечивать сбор информации от генерирующих установок, СНЭЭ, текущей нагрузки, инсоляции и температуры окружающей среды. Центральный контроллер взаимодействует с энергоустановками ФДЭС во взаимодвижении с их управляющими контроллерами нижнего уровня и формирует оптимальные конфи-

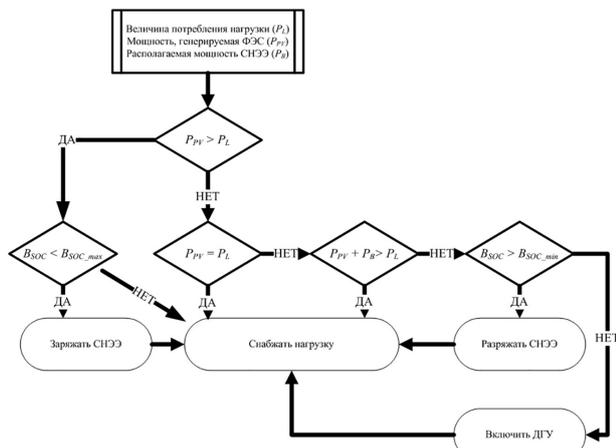


Рис. 2. Логическая карта алгоритма управления генерирующими источниками фотодизельной системы электроснабжения на постоянном токе

гuration и режимы энергетического оборудования [13–15].

Для наглядной демонстрации управляющей логики ФДЭС на постоянном токе авторы приняли решение воспользоваться стандартной библиотекой Logic and Bit Operations в Simulink. Режимы работы энергетического оборудования соответствуют чередованию светлого и тёмного времени суток, когда ФЭС работает с избытком или недостатком полезной генерации. Эти режимы выбираются в зависимости от балансной мощности внутри гибридной системы, величины инсоляции и состояния заряда батареи (от англ. State of charge — SOC). Баланс мощности ШПТ используется как мера для обнаружения дисбаланса нагрузки. К примеру, если величина мощности на ШПТ больше, чем P_L , система вырабатывает больше энергии, чем требу-

ется нагрузке. Если мощность на ШПТ меньше P_L , то нагрузка требует большей мощности, чем генерирует система. Состояния, в которых определяется фактическое значение баланса мощности на ШПТ, представлены на рис. 2.

Чтобы оценить потоки энергии, контроллер сравнивает значение генерируемой мощности (P_{PV}) с потребляемой нагрузкой (P_L). Если возобновляемая энергия от ФЭС превышает потребность в нагрузке, избыточная мощность идёт на зарядку СНЭЭ, если их уровень заряда не достигает максимального значения (B_{SOC_max}). Если потребность в нагрузке (P_L) ниже, чем возобновляемая мощность (P_{PV}), а состояние заряда СНЭЭ не достигает своего минимального значения (B_{SOC_min}), СНЭЭ может отдавать свою мощность (P_B) в нагрузку. Если уровень заряда аккумуляторов СНЭЭ достигает минимального значения (B_{SOC_min}), ДГУ должен запускаться и питать нагрузку.

Эта стратегия интеллектуального подхода используются для управления работой ДГУ и СНЭЭ, где ДГУ генерирует энергию, достаточную только для нагрузки, и не заряжает СНЭЭ. СНЭЭ заряжается только за счет избыточной мощности от ФЭС. В светлое время: при высоком уровне освещённости нагрузка питается через инвертор, работающий в автономном режиме от аккумуляторов СНЭЭ. ДГУ — выключена; при недостаточном уровне освещённости, на начальном этапе, нагрузка питается от ФЭС и СНЭЭ до момента падения энергии заряда аккумуляторов до минимально допустимого уровня. Далее включается ДГУ и к ШПТ подключается источник, работающий в режиме источника напряжения. ДГУ дополняет недостающую мощность ФЭС, работающей в режиме источника тока. СНЭЭ работает в буферном режиме.

В тёмное время суток: работает ДГУ, обеспечивая электроэнергией автономную нагрузку. СНЭЭ может быть отключена или использоваться для вы-

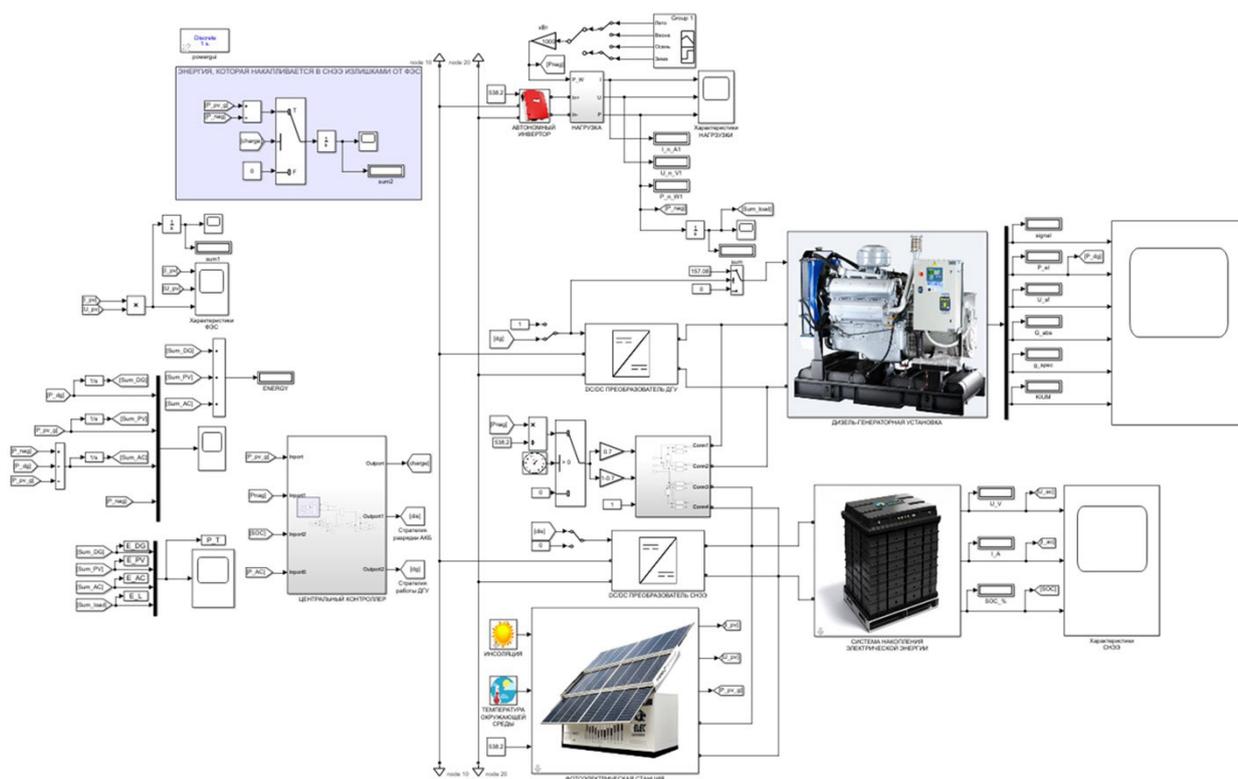


Рис. 3. Модель фотодизельной системы электроснабжения на постоянном токе в Matlab/Simulink

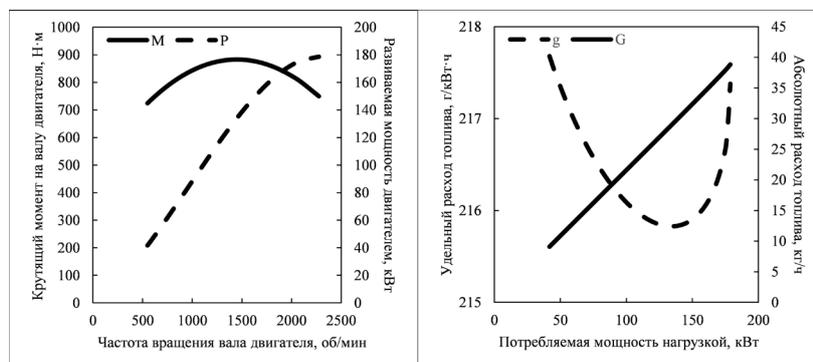


Рис. 4. Паспортные характеристики дизельного двигателя ЯМЗ-238-М2: слева — внешнескоростная характеристика, справа — характеристика расходов

равнивания графиков нагрузки ДГУ, участвуя в покрытии пиковых нагрузок.

Фотодизельная система электроснабжения на постоянном токе в Matlab/Simulink. Авторы рассматривают статические вариации моделей компонентов ФДЭС на постоянном токе. Представленная на рис. 3 ФДЭС-модель позволяет использовать численные методы решения с итерационным шагом 1 секунда. Модель позволяет исследовать последовательность статических режимов автономной системы электроснабжения на постоянном токе в течение суток в заданном масштабе времени: сутки соответствуют времени моделирования 24 секунды, обеспечивая возможность исследования суточных изменений энергетических характеристик системы. В качестве инструмента моделирования был выбран Matlab и его приложение блочного моделирования Simulink, возможности которого приемлемы и достаточны для выполнения поставленных задач.

В качестве примера для опорного источника электроэнергии использовался дизельный двигатель (ДД) ЯМЗ-238-М2 в составе ДГУ АД-100 (Россия). Заявленные производителем расходные и внешнескоростные характеристики приведены на рис. 4. При построении имитационной модели ДД использовались методики [16–20], на основании которых получены математические выражения для расхода топлива и вырабатываемой мощности. Полученные зависимости соотносятся с паспортными данными ДД. При создании имитационной модели ДД предполагается, что двигатель, включенный в состав ДГУ, имеет всережимный регулятор частоты вращения.

Основными аппроксимированными выражениями, определяющими выходные данные ДД, полученные на основе корреляционно-регрессионного анализа в MS Excel, являются

$$G_{abs} = 3 \cdot 10^{-5} \cdot P_{нар}^2 + 0,2095 \cdot P_{нар} + 0,3303, \quad (1)$$

где G_{abs} — величина абсолютного расхода дизельного топлива в зависимости от потребляемой нагрузки; $P_{нар}$ — величина потребляемой нагрузки в конкретный час суточного графика.

$$g_{spec} = 2 \cdot 10^{-11} \cdot P_{нар}^6 - 1 \cdot 10^{-8} \cdot P_{нар}^5 + 3 \cdot 10^{-6} \cdot P_{нар}^4 - 0,0004 \cdot P_{нар}^3 + 0,0261 \cdot P_{нар}^2 - 0,9706 \cdot P_{нар} + 23245, \quad (2)$$

где g_{spec} — величина удельного расхода дизельного топлива на каждый потреблённый кВт·ч электрической энергии.

Полученные выражения позволяют провести оценку режимов работы ДД и уровень потребления топлива для текущего режима. Данная статическая модель ДД достаточна для решаемых в работе задач, но может быть развита до динамического уровня. Так, функция момента, развиваемого ДД, является многопараметрической нелинейной функцией большого числа параметров: положение органа управления топливного насоса высокого давления, абсолютный расход топлива, температура двигателя и пр. Таким образом, исходя из сформулированного определения интеллектуальных энергетических систем [21], а также полученных требований и подходов к управлению ФДЭС на постоянном токе, в дальнейшем, авторы ставят задачу исследования динамических характеристик ДЭС в составе подобных электротехнических комплексов.

Для моделирования электрической машины учитывается взаимосвязь электродвижущей силы (ЭДС) генератора с изменяющимся магнитным потоком. При этом напряжение на зажимах СГ меньше ЭДС на величину внутреннего падения напряжения:

$$\vec{U} = \vec{\varepsilon} - \vec{I}Z, \quad (3)$$

где $\vec{\varepsilon}$ — действующее значение ЭДС; \vec{I} — ток в обмотке статора (ток нагрузки); Z — полное сопротивление обмотки статора (одной фазы).

В качестве выпрямителя используется известная мостовая трёхфазная схема на полупроводниковых диодах. Если считать, что вентили идеальные, а также пренебречь потерями напряжения за счёт явления коммутации вентилей, то среднее значение напряжения на выходе данного выпрямителя будет определяться выражением [22]:

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot \vec{U}. \quad (4)$$

Следует отметить, что при нормальном фазном напряжении СГ 230 В рассматриваемый выпрямитель выдаёт постоянное напряжение 540 В.

Компьютерная реализация модели ДГУ показана на рис. 5. Модель имеет две входные скалярные величины: логический сигнал управления, характеризующий состояние работы ДГУ, а также сигнал величины потребляемой нагрузки.

Шина сигналов помогает рассредоточить искомые скалярные выходные значения ДД, СГ в составе ДГУ. В рамках поставленной задачи это логический сигнал управления, выходная электрическая мощность СГ, действующее выпрямленное напряжения

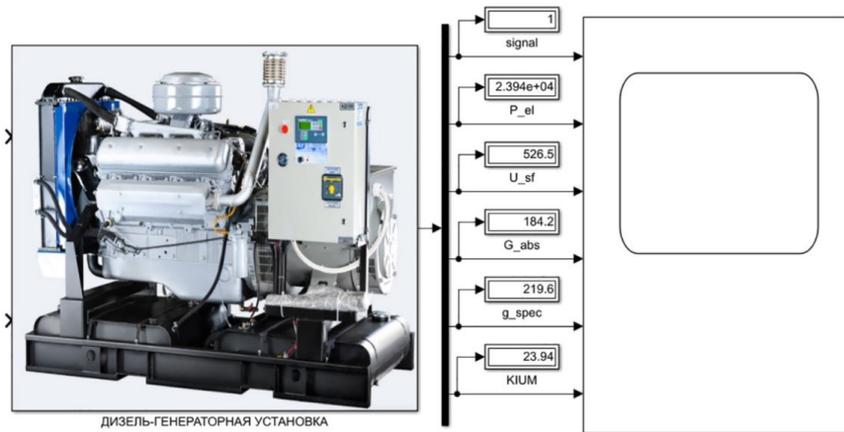


Рис. 5. Модель дизель-генераторной установки на постоянном токе в Matlab/Simulink



Рис. 6. Модель фотоэлектрической станции в Matlab/Simulink

статорной обмотки СГ, величина абсолютного расхода дизельного топлива ΔD , величина удельного расхода топлива Δd , а также коэффициент использования установленной мощности (КИУМ).

Модель ФЭС основана на выходных характеристиках солнечной ячейки и упрощенных математических функциях, которые представлены в виде блока subsystemы (рис. 6). Для построения модели ФЭС использовалась методика, предложенная [23], согласно которой максимальная выходная мощность ФЭС определяется по выражению:

$$P_{\text{ФЭС}} = \frac{C_F \cdot N \cdot G \cdot \ln(10^6 \cdot G)}{T_{\text{ФЭС}}}, \quad (5)$$

где N — количество фотоэлектрических модулей в станции; C_F — постоянный коэффициент в параметрах фотоэлектрического модуля; G — текущий уровень инсоляции; $T_{\text{ФЭС}}$ — текущая температура фотоэлектрического модуля.

ФЭС эквивалентуется управляемым источником постоянного тока. Массив солнечных панелей, входящих в состав subsystemы ФЭС, передают генерируемый ток напрямую в СНЭЭ. Влияние солнечного контроллера учитывается как пропорциональное снижение коэффициента полезного действия.

Внутренние параметры модели определяются данными номенклатуры солнечной панели и их количеством [24]. Входными переменными данными являются текущие значения величины инсоляции и температуры приемной поверхности. Результаты моделирования показали, что разработанная модель

имитирует текущие характеристики ФЭС с удовлетворительной точностью в окрестностях точки максимальной мощности. Максимальная погрешность расчетных значений выходной мощности во всём диапазоне возможных изменений температуры и инсоляции не превышает 4 % [25]. Это позволяет использовать модель ФЭС для разработки эффективных алгоритмов контроллеров ФЭС, совершенствования схемотехники преобразовательных устройств, прогнозирования выработки электроэнергии, анализа рабочих режимов фотоэлектрических систем

Величина первичной инсоляции, которая поступает на поверхность ФЭС, определяется интенсивностью суммарного излучения в месте её установки. Данная величина зависит от координат местоположения ФЭС, пространственной ориентации, а также от внешних метеорологических факторов: температуры воздуха, уровня облачности, коэффициента отражения земной поверхности. В основу расчета инсоляции в данной работе положена методика, позволяющая определить почасовое поступление инсоляции на наклонную плоскость и соответствующая используемому масштабу времени, предложенная Лю и Джорданом [26].

Совокупность математических уравнений была определена в соответствии с работами [27, 28] с некоторыми усовершенствованиями в рамках поставленной задачи:

$$\begin{cases} Q_{\text{накл}} = S_{\text{накл}} + D_{\text{накл}} + R_{\text{накл}} \\ S_{\text{накл}} = S_{\text{орт}} \cdot \cos \theta \\ D_{\text{накл}} = D_{\text{гориз}} [0,55 + 0,434 \cos \theta + 0,313 (\cos \theta)^2] \\ R_{\text{накл}} = 0,47 \cdot A_{\text{земли}} \cdot (S_{\text{накл}} - D_{\text{гориз}}) \end{cases}, \quad (6)$$



Инсоляция

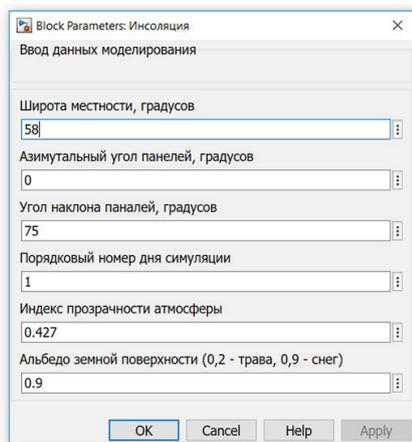


Рис. 7. Модель инсоляции в Matlab/Simulink

где $Q_{накл}$ — суммарная солнечная радиация, падающая на наклонную поверхность, Вт/м²; $S_{накл}$ — прямое солнечное излучение, падающее на наклонную поверхность, Вт/м²; $D_{накл}$ — рассеянная солнечная энергия, падающая на наклонную поверхность, Вт/м²; $R_{накл}$ — излучение, отраженное от поверхности Земли, Вт/м² (значением можно пренебречь); $S_{орт}$ — прямое солнечное излучение на ортогональную лучам плоскость, Вт/м²; $\cos\theta$ — косинус угла падения прямого солнечного излучения на любую плоскость; $D_{гориз}$ — поток рассеянной солнечной энергии на горизонтальную плоскость, Вт/м²; $A_{земли}$ — альbedo Земли.

Данные вводятся в управляемый блок подсистемы Simulink, показанный на рис. 7. Сравнение среднесуточных значений инсоляции из модельного блока со среднесуточными значениями метеонаблюдений, определенными за рассматриваемый период времени, показало, что максимальная погрешность не превышает 13 %, что свидетельствует о приемлемой репрезентативности.

Среднемесячные и среднесуточные значения температуры окружающего воздуха определяются наиболее просто. Они являются независимыми величинами от параметров проектируемой электроустановки. Исходными данными для их определения являются статистические данные метеорологических наблюдений, которые можно получить из архивов метеорологических порталов и климатических справочников [29]. В рамках данного исследования, авторы вводят среднесуточное значение температуры, измеряемое в Кельвинах, в виде блока константы.

Для моделирования системы хранения электрической энергии использован метод, основанный на обобщенном соотношении Шеферда, задающийся выражением [30]:

$$U_{АКБ} = E_0 - \frac{M \cdot Q}{(Q - \int idt)} - R \cdot i + A \cdot e^{-B \cdot \int idt}, \quad (7)$$

где $U_{АКБ}$ — напряжение массива; E_0 — напряжение холостого хода не нагруженного массива; M — поляризационное сопротивление; Q — фактическая емкость массива; $\int idt$ — действительный уровень заряда аккумуляторного массива; i — ток батареи; R — внутреннее сопротивление аккумулятора; A — коэффициент, характеризующий величину падения напряжения во время экспоненциальной зоны разряда; B — коэффициент, характеризующий обратную величину емкости массива в конце экспоненциальной зоны разряда.

Основное назначение СНЭЭ в гибридной системе — обеспечение бесперебойности электроснабжения потребителя. Кроме того, блок обеспечивает согласование графиков потребления и генерации за счёт дополнительного запаса электроэнергии в автономном электротехническом комплексе. Для реализации этих возможностей необходимо интеллектуальное управление источниками электрической энергии в системе.

Внутри подсистемы (рис. 8) моделирование внешней характеристики СНЭЭ происходит с помощью управляемого источника напряжения, включенного последовательно с постоянным сопротивлением, учитывающим потери. Ввод основных параметров через диалоговое окно позволяет манипулировать параметрами системы для исследования характеристик ФДЭС на постоянном токе. Анализ показывает, что модель может работать с достаточной точностью. Максимальная погрешность напряжения в условиях изменения входных величин относительно паспортных данных аккумуляторной батареи Delta DTM 12250 L составляет ± 2 %.

Для моделирования различных типов потребителей децентрализованных объектов в сельской местности, показатели электропотребления определяются в соответствии с нормативными типовыми графиками реальных электрических нагрузок. Данные этих графиков получены в ходе статистических наблюдений за период от 5 до 10 лет на основании работ [31, 32].

Модель децентрализованного потребителя представлена на рис. 9. Основой модели электрической нагрузки служил блок Signal Builder, в котором ти-

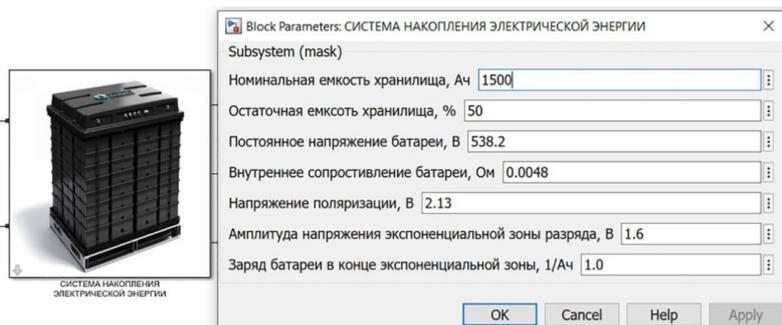


Рис. 8. Модель системы хранения электрической энергии в Matlab/Simulink

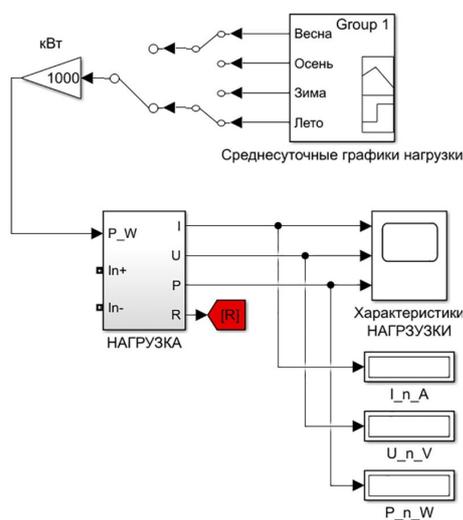


Рис. 9. Модель децентрализованного потребителя в Matlab/Simulink

повые графики сезонной активной нагрузки сельских жилых домов вводились в блок через заранее прописанный цикл синтаксиса Matlab – for.

Электрическая часть модели нагрузки построена на базе управляемого источника тока, где входным параметром служила величина выходного напряжения инвертора. Для контроля выходных параметров: ток, напряжение, а также активная мощность, на выходах блока потребителя электроэнергии предусмотрен контроль через осциллограф.

Результаты имитационного моделирования работы фотодизельной системы электроснабжения на постоянном токе в Matlab/Simulink. Рассмотрены несколько экспериментальных примеров для проверки предложенной системы управления фотодизельной системы электроснабжения на постоянном токе. На основе управляющих команд с соблюдением энергетического баланса центральный контроллер управляет режимами работы DC/DC преобразователей ДГУ, СНЭЭ, а также их совместной работой, при изменении условий уровня солнечного излучения, температуры окружающей среды, нагрузки. Характеристики производительности системы при условии максимального вклада возобновляемого энергонесителя показаны на рис.

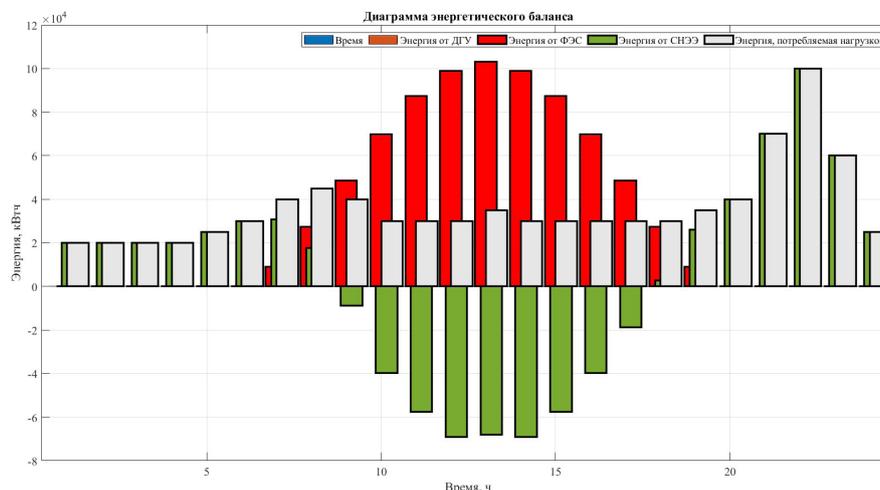


Рис. 10. Диаграмма энергетического баланса в условиях летней нагрузки

10, 11. Для отображения результирующих графиков необходимо обозначить ряд входных данных, представленных в табл. 1.

Энергия ФЭС варьируется в зависимости от количества поступающего солнечного излучения. При отсутствии энергии ФЭС, обменная энергия разряда СНЭЭ следует за изменением уровня электропотребления. Когда выработка электроэнергии от ФЭС начинает увеличиваться, СНЭЭ начинает работать совместно с ФЭС, что видно с 07:00 до 08:00 и с 18:00 до 19:00. Ток батареи показан на рис. 11, который следует за изменениями мощности ФЭС для поддержания необходимой мощности на ШПТ. Напряжение на ШПТ остается постоянным, несмотря на изменения на ФЭС.

В период времени с 09:00 до 17:00 ФЭС вырабатывает больше энергии, чем требуется для нагрузки. Эта избыточная энергия идёт на заряд СНЭЭ. На рис. 11 видно, что за это время показатель SOC увеличивается. Результаты моделирования подтверждают, что разработанная система обеспечивает бесперебойное электроснабжения нагрузки. Анализируя графики (рис. 11) следует сделать вывод, что все компоненты системы работают правильно, а именно: график нагрузок полностью обеспечен энергией, блок СНЭЭ по мере разряда/заряда переключаются в соответствии с разработанной логикой работы. В часы нехватки запасенной энергии и энергии ФЭС должен запускаться ДГУ, однако, в соответствии с входными данными табл. 1, работа ДГУ в рассматриваемый сезон (лето) не требуется. Напряжение на ШПТ равно 540 ± 10 (В), что является допустимым.

Необходимо отметить, что, в соответствии с уровнем SOC (на рис. 11), ёмкости заряда СНЭЭ хватает для обеспечения такого же режима работы следующих летних суток. Результаты проверки показывают, что режим управления ФДЭС работает корректно. Для моделирования режима работы ФДЭС в зимние сутки необходимо изменить входные данные для следующего эксперимента в соответствии с табл. 2. Производительность ФДЭС-системы при низком уровне выработки ФЭС представлена на рис. 12. Выработка энергии ФЭС меньше, чем требуемая величина нагрузки с 10:00 до 16:00. Исходя из входных параметров и условий работы управляющей логики центрального контроллера, система реагирует на выполнение

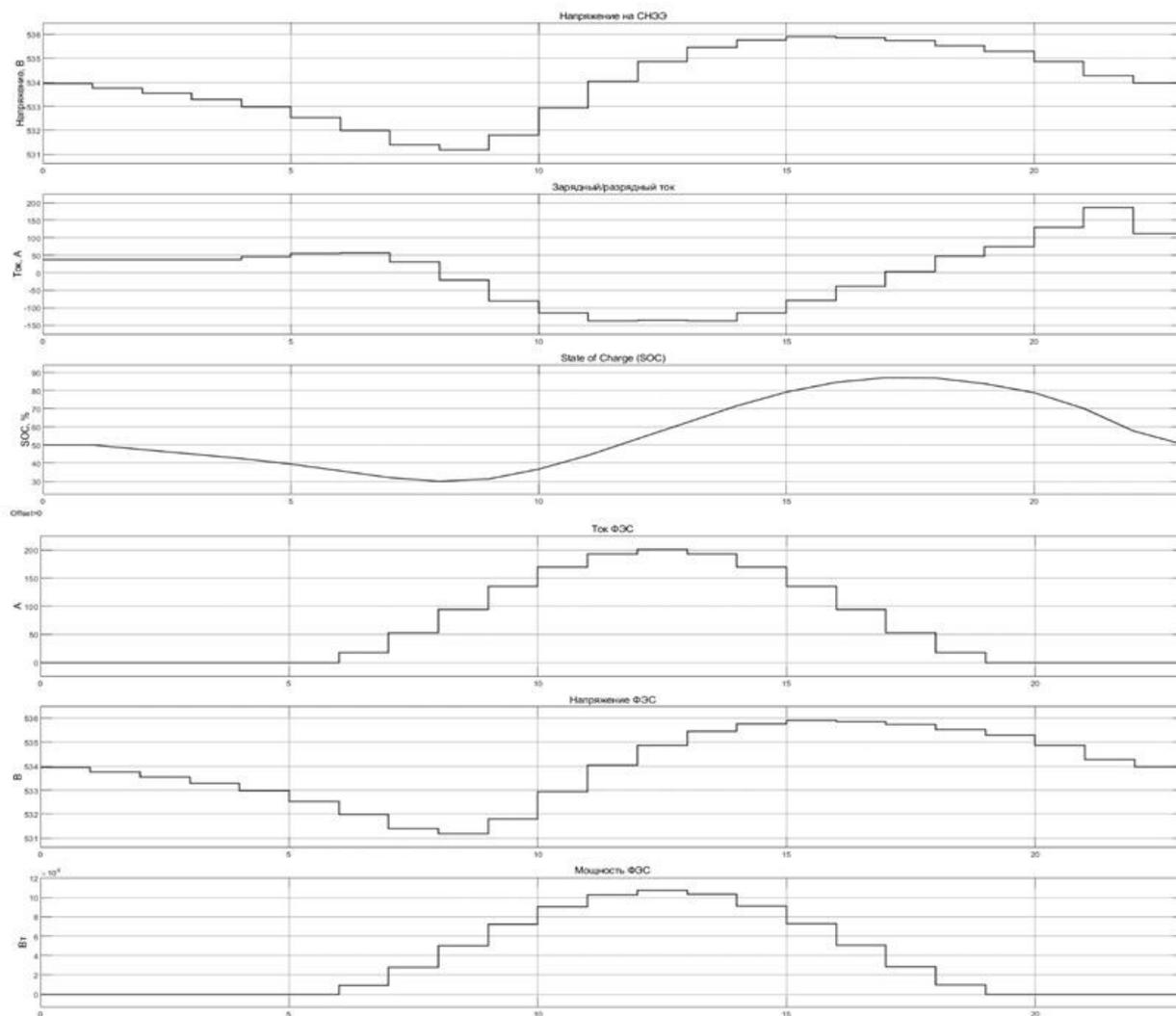


Рис. 11. График мощности, напряжения и тока от системы накопления электрической энергии и фотоэлектрической станции

Таблица 1

Входные данные моделирования режима работы в условиях максимального вклада фотоэлектрической станции

График нагрузки	Номер моделируемого дня	Угол наклона солнечных панелей, град.	Средняя температура воздуха моделируемого дня, °С	Начальная ёмкость заряда СНЭЭ, %	Координата расположения объекта, град. с.ш.
Летний	152	30	23	50	58

Таблица 2

Входные данные моделирования режима работы в условиях компенсации пиковых нагрузок

График нагрузки	Номер моделируемого дня	Угол наклона солнечных панелей, град.	Средняя температура воздуха моделируемого дня, °С	Начальная ёмкость заряда СНЭЭ, %	Координата расположения объекта, град. с.ш.
Зимний	1	75	-24	50	58

режима использования СНЭЭ для выравнивания графиков нагрузки ДГУ, участвуя в покрытии пиков. До момента времени 06:00 ДГУ полностью обеспечивает нагрузку, СНЭЭ находится в состоянии отработки режима разряда в моменты предельного снижения уровня напряжения на ШПТ.

На рис. 13 показаны электрические параметры СНЭЭ и ДГУ во время процесса совместной работы. После утреннего и вечернего пиков видно, что связка СНЭЭ-ФЭС получает достаточную зарядную мощность, чтобы снабдить следующие сутки (параметр SOC). Однако текущая команда, генерируе-

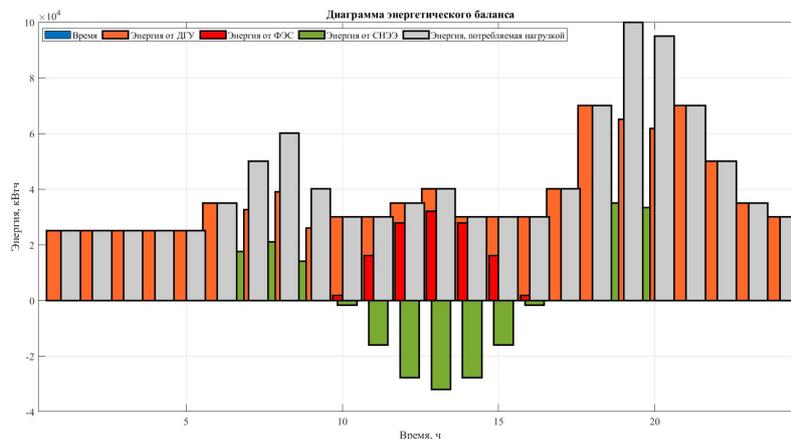


Рис. 12. Диаграмма энергетического баланса в условиях зимней нагрузки

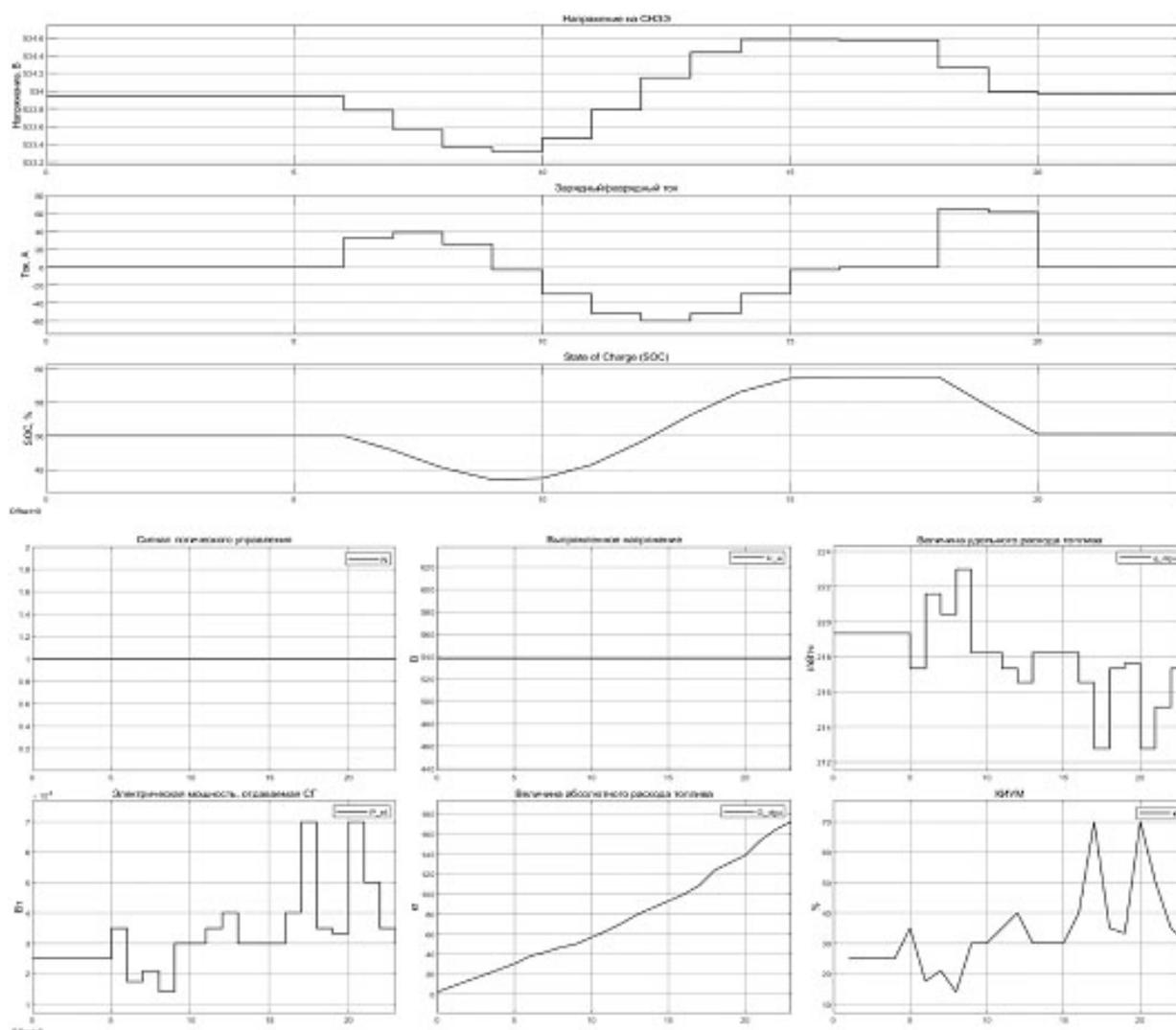


Рис. 13. Выходные графики от системы накопления электрической энергии и дизель-генераторной установки

мая контроллером управления мощностью, выполняет быстрое восстановление мощности нагрузки, а также напряжения ШПТ, не оптимизируя оптимальную загрузку ДГУ. Данное условие возможно осуществить путём разряда батареи через подачу пропорциональной величины тока в соответствии характеристикой DC/DC преобразователя. В этом случае необходимо рассматривать ДГУ выпрямительного типа с управляемым преобразовательным звеном.

Графики рис. 13 показывают, что разработанная система управления и контроля обменной энергии приемлемо работоспособна в случае отсутствия достаточной выработки электроэнергии из возобновляемых источников. Также соблюден плавный переход между состояниями заряда/разряда при различных входных условиях.

Заключение. Разработана оригинальная имитационная модель фотодизельной системы электропитания на постоянном токе, обеспечивающая

исследование её рабочих режимов в реальных условиях эксплуатации. В ней учтено влияние внешних климатических факторов на энергетические характеристики фотоэлектрической станции, что повышает точность прогнозных расчетов в выработке электроэнергии для рассматриваемого региона.

Исходными данными моделирования являются широта местности, индекс прозрачности атмосферы, альbedo земной поверхности, номер дня года, азимутальный и вертикальный углы установки фотопанелей, среднесуточная температура воздуха, технические характеристики ФЭС, а также характеристики СНЭЭ и ДГУ. Полученные при моделировании режимов ФДЭС результаты обеспечивают возможность аргументированного выбора рационального режима эксплуатации электростанции, требуемой ёмкости накопительных устройств, установленной мощности и номинального напряжения фотопанелей, а также определения эффективных алгоритмов управления энергетическим комплексом.

Представленная имитационная модель и проведённые исследования показали преимущества ФДЭС на постоянном токе по сравнению с аналогичными системами переменного тока. ФДЭС с ШПТ могут обеспечить надежное электроснабжение потребителей, увеличивая вклад в энергобаланс фотоэлектричества по сравнению с гибридными системами электроснабжения на переменном токе. В отличие от систем с сетевым инвертором на переменном токе, ограничение мощности генерации ФЭС относительно мощности ведущего источника — ДГУ на уровне 30–40 % отсутствует. ФДЭС на постоянном токе может обеспечить: экономичное электроснабжение децентрализованных потребителей за счёт оптимизации установленных мощностей и режимов фотоэлектростанции и ДЭС, что позволяет существенно снизить потребление дизельного топлива.

Снижение уровня потребления топлива влечёт уменьшение экономически обоснованного тарифа на электроэнергию до 30 %. Снижается уровень карбонизации воздуха от ДГУ на уровне до 20 %. Однако практическое внедрение гибридных энергоисточников на постоянном токе требует проведения дальнейших комплексных исследований по широкому кругу вопросов, в частности по разработке гибридных интеллектуальных систем, например, с использованием энергосберегающих режимов дизельных электрических станций с переменной частотой вращения дизель-генераторов и статическими преобразователями частоты.

Библиографический список

1. Кобец Б. Б., Волкова И. О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. Москва: ИАЦ Энергия, 2010. 208 с.
2. International Energy Agency (IEA). Electricity: Global electricity demand is expected to fall by 5% in 2020, 2020. URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020/electricity> (дата обращения: 15.06.2021).
3. Губенко А. Россия присоединилась к Парижскому соглашению по климату // РБК. URL: <https://www.rbc.ru/politics/23/09/2019/5d88a9089a79475f76930863> (дата обращения: 15.06.2021).
4. Лукутин Б. В., Обухов С. Г., Шутов Е. А., Хошнау З. П. Применение буферных накопителей энергии для повышения энергоэффективности ветродизельных электростанций // Электричество. 2012. № 6. С. 24–29.
5. Fairley P. DC Versus AC: The Second War of Currents Has Already Begun [In My View] // IEEE Power and Energy Magazine. 2012. Vol. 10 (6). P. 104–103. DOI: 10.1109/MPE.2012.2212617.
6. Vossos V., Pantano S., Heard R. DC Appliances and DC power distribution. In: A Bridge to the Future Net Zero Energy Homes. Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). 2017. P. 1–14.
7. Vallve X., Serrasolses J. Design and operation of a 50 kWp PV rural electrification project for remote sites in Spain // Solar Energy. 1997. Vol. 59 (1-3). P. 111–119. DOI: 10.1016/S0038-092X(96)00124-7.
8. Ramli M. A. M., Bouchekara H. R. E. H., Alghamdi A. S. Optimal sizing of PV/wind/diesel hybrid microgrid system using multi-objective self-adaptive differential evolution algorithm // Renewable Energy Journal. 2018. Vol. 121. P. 400–411. DOI: 10.1016/j.renene.2018.01.058.
9. Лаврик А. Ю., Жуковский Ю. А., Максимов Н. А. Определение оптимального состава резервируемой гибридной ветро-солнечной электростанции // Промышленная энергетика. 2019. № 10. С. 47–53.
10. Пашкевич Р. И., Павлов К. А. Математическое моделирование комбинированной дизель-солнечной электростанции для децентрализованного электроснабжения потребителей // Электрические станции. Возобновляемая энергетика. 2019. № 9 (1058). С. 30–35.
11. Taskin J., Carter C., Schmidt T. [et al.]. An energy flow simulation tool for incorporating short-term PV forecasting in a diesel-PV-battery off-grid power supply system // Applied Energy. 2019. Vol. 254. 113718. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113718.
12. Ramli M. A. M., Bouchekara H. R. E. H., Alghamdi A. S. Optimal sizing of PV/wind/diesel hybrid microgrid system using multi-objective self-adaptive differential evolution algorithm // Renewable Energy. 2018. Vol. 121. P. 400–411. DOI: 10.1016/j.renene.2018.01.058.
13. Антонов Б. М., Баранов М. М., Крюков К. В., Розанов Ю. К. Управление гибридным энергокомплексом на основе возобновляемых источников энергии разных видов // Электричество. 2018. № 7. С. 19–25. DOI: 10.24160/0013-5380-2018-7-19-25.
14. Тюхов И. И., Беренгартен М. Г., Вариводов В. Н., Смакин В. В. Особенности формирования интеллектуальных сетей гибридных комплексов энергоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии // Возобновляемая энергетика: Проблемы и перспективы: II Междунар. конф. Махачкала, 2010. С. 238–245.
15. Rezk H., Al-Dhaifallah M., Hassan Y. B. [et al.]. Optimization and Energy Management of Hybrid Photovoltaic-Diesel-Battery System to Pump and Desalinate Water at Isolated Regions // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 102512–102529. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998720.
16. Дизельный генератор АД-100 (ЯМЗ-238М2) // Компания ДИЗЕЛЬ. 2020. URL: <https://www.comd.ru/catalog/dizelnye-elektrostancii-tseny-des/professional/dgu-dizel-generatory-yamz/dizelnaya-elektrostanciya-100-kvt-ad-100-t400-yamz-238m2/> (дата обращения: 15.06.2021).
17. Theubou Tameghe T. A., Wamkeue R., Kamwa I. Diesel Generator Modelling for Microgrid Power Plant Parameters Assessment // EIC Climate Change Technology Conference. At: Montréal, Qc, Canada. 2015. P. 1–12.
18. Grama A., Petreus D., Etz R. [et al.]. Fuel consumption reduction of a diesel-electric power generator // 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). 2015. P. 381–384. DOI: 10.1109/ISSE.2015.7248026.
19. Yin C., Wu H., Locment F. [et al.]. Energy management of DC microgrid based on photovoltaic combined with diesel generator and supercapacitor // Energy Conversion and Management. 2017. Vol. 132. P. 14–27. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.11.018.
20. Wies R. W., Johnson R. A., Agrawal A. N. [et al.]. Simulink model for economic analysis and environmental impacts of a PV with diesel-battery system for remote villages // IEEE

Transactions on Power Systems. 2005. Vol. 20 (2). P. 692–700. DOI: 10.1109/TPWRS.2005.846084.

21. Lukutin B. V., Kiushkina V. R. Intellectual energy security monitoring of decentralized systems of electricity with renewable energy sources // International Conference Green Energy and Smart Grids (GESG 2018). 2018. Vol. 69. 02002. 5 p. DOI: 10.1051/e3sconf/20186902002.

22. Perelmuter V. Electrotechnical Systems: Simulation with Simulink and SimPowerSystems. 1st ed. CRC Press, 2013. 450 p. DOI: 10.1201/b13013.

23. Андреев В. М., Грилихес В. А., Румянцев В. Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Ленинград: Наука, 1989. 310 с.

24. Технические характеристики солнечной панели TSM-200 // МАП Sin Энергия 12/24/48 220. URL: http://www.invertor.ru/zzz/item/white_fe_mono_200_24 (дата обращения: 15.06.2021).

25. Obukhov S. G., Plotnikov I. A., Kryuchkova M. Simulation of Electrical Characteristics of a Solar Panel // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 132 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/132/1/012017.

26. Liu B. Y. H., Jordan R. C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator // ASHRAE Transactions. 1961. Vol. 3. P. 53–59.

27. Обухов С. Г., Плотников И. А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 6. С. 38–51.

28. Обухов С. Г., Плотников И. А. Выбор параметров и анализ эффективности применения систем слежения за солнцем // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 10. С. 95–106. DOI: 10.18799/24131830/2018/10/2109.

29. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Выпуск 22: Иркутская область и западная часть Бурятской АССР / Комитет по ги-

дрометеорологии при Кабинете министров СССР. Ленинград: Гидрометеоздат, 1991. 304 с.

30. Shepard C. M. Design of Primary and Secondary Cells: II. An Equation Describing Battery Discharge // Journal of Electrochemical Society. 1965. Vol. 112 (7). P. 657–664. DOI: 10.1149/1.2423659.

31. Лещинская Т. Б., Наумов И. В. Практикум по электроснабжению сельского хозяйства. Москва: БИБИКОМ–Транслог, 2015. 455 с. ISBN 978-5-905563-46-1.

32. Будзко И. А., Лещинская Т. Б., Сукманов В. И. Электроснабжение сельского хозяйства. Москва: КолосС, 2000. 536 с.

ЛУКУТИН Борис Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики (ИШЭ).

SPIN-код: 5558-7038

AuthorID (РИНЦ): 113093

ORCID: 0000-0002-5201-6886

AuthorID (SCOPUS): 56617283300

Адрес для переписки: lukutin48@mail.ru

МУРАВЬЕВ Дмитрий Игоревич, аспирант отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ.

Адрес для переписки: dim15@tpu.ru

Для цитирования

Лукутин Б. В., Муравьев Д. И. Имитационная модель фотодизельной системы электроснабжения с интеллектуальным управлением в Matlab/Simulink // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 52–62. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-52-62.

Статья поступила в редакцию 18.06.2021 г.

© Б. В. Лукутин, Д. И. Муравьев