

УДК 621.311.25: 621.311.29

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АВТОНОМНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Обухов Сергей Геннадьевич¹,
serob99@mail.ru

Плотников Игорь Александрович¹,
igorplt@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Огромный потенциал, экологическая чистота и доступность солнечной энергии обеспечивают стремительное развитие фотоэлектрической технологии преобразования энергии, которая находит практическое применение в самых разнообразных областях человеческой жизнедеятельности. Основной технической проблемой автономных энергетических систем с возобновляемыми источниками является необходимость согласования режимов производства и потребления энергии, что требует достоверного определения энергетического баланса с высокой временной дискретизацией. Нелинейность характеристик основных элементов фотоэлектрических станций, а также их ярко-выраженная зависимость от внешних факторов, многие из которых имеют стохастическую природу, определяет высокую сложность и актуальность задачи определения их энергетических характеристик в реальных условиях эксплуатации.

Цель исследования: разработка имитационной модели автономной фотоэлектрической станции, обеспечивающей моделирование ее рабочих режимов с учетом реальных условий эксплуатации.

Методы исследования: математическое и компьютерное моделирование с использованием программной среды MatLab/Simulink.

Результаты. Разработана имитационная модель автономной фотоэлектрической станции, состоящая из шести основных компонентов: модель прихода солнечной радиации, солнечная батарея, преобразователь постоянного напряжения (контроллер заряда), аккумуляторная батарея, инвертор, электрическая нагрузка. Все модели компонентов выполнены в виде отдельных подсистем в программной среде MatLab/Simulink, обладают свойством масштабирования, что позволяет проводить исследования фотоэлектрических систем произвольной конфигурации. Особенностью предложенной модели является учет влияния внешних климатических факторов на энергетические характеристики солнечной батареи, что обеспечивает повышение точности прогнозных расчетов в выработке электроэнергии.

Ключевые слова:

Автономная фотоэлектрическая станция, солнечная батарея, солнечная радиация, имитационная модель, MatLab, Simulink.

Введение

При использовании фотоэлектрических станций (ФЭС) в системах электроснабжения изолированных потребителей, в большинстве практических случаев, они работают в составе гибридных энергетических комплексов с несколькими генерирующими источниками соизмеримой мощности. При этом гибридные системы могут существенно различаться по составу источников энергии, структуре построения, способам управления режимами [1–3]. Важнейшей задачей проектирования гибридных систем с возобновляемыми энергетическими источниками является согласование режимов производства и потребления энергии, для чего требуется высокая дискретизация прогнозной выработки электрической энергии различными источниками: от среднесуточной до почасовой. Тщательный анализ энергетического баланса необходим для решения таких задач проектирования, как оптимизация соотношения установленных мощностей генерирующих источников, выбора параметров регулирующих устройств и настройки систем управления [4, 5].

Основная проблема достоверного определения энергетического баланса ФЭС заключается в том, что непосредственное влияние на него оказывают разнообразные факторы, многие из которых име-

ют стохастическую природу. Например, на энергетические характеристики фотоэлектрических преобразователей существенное влияние оказывает интенсивность солнечного излучения и температура окружающего воздуха. Величина солнечной радиации определяет величину фототока фотоэлектрических модулей (ФМ), а температура окружающей среды оказывает определяющее влияние на температуру поверхности солнечной батареи (СБ), от которой практически линейно зависит величина напряжения холостого хода ФМ [6–8].

Нелинейность характеристик основных элементов ФЭС, а также их зависимость от внешних факторов существенно усложняют решение обозначенной задачи, что вызывает необходимость применения методов математического моделирования.

Объект исследования и постановка задачи

Типичная схема построения автономной ФЭС представлена на рис. 1.

Основными элементами автономной ФЭС являются: СБ, состоящая из набора последовательно-параллельно соединенных ФМ; преобразователь постоянного напряжения, работающий под управлением контроллера поиска точки максимальной мощности; накопитель энергии на базе аккумуляла-



Рис. 1. Схема построения автономной фотоэлектрической станции

Fig. 1. Block diagram of the autonomous photovoltaic plant

торных батарей и выходной инвертор напряжения. Часто для повышения энергетической эффективности ФЭС ее дополнительно комплектуют системой слежения за Солнцем. В этом случае в состав ФЭС также будет входить блок управления солнечным трекером и исполнительный механизм следящей системы, построенный на базе двигателя с редукторами.

Необходимым условием построения комплексной модели электростанции является согласование моделей элементов в составе единой энергетической системы, что определяет выбор единого универсального инструмента моделирования. В настоящей работе модели всех компонентов электростанции реализованы в MatLab/Simulink в виде отдельных подсистем, что позволяет использовать их для исследования режимов ФЭС произвольной конфигурации.

При разработке математической модели ФЭС было учтено, что ее функционирование характеризуется большим разбросом скорости протекания процессов в отдельных элементах (подсистемах). Так, для полупроводниковых преобразователей постоянные времени составляют доли секунды, для аккумуляторной батареи – минуты, для электрической нагрузки – часы. Данное обстоятельство обуславливает, с одной стороны, проблемы построения и реализации адекватных математических моделей компонентов, с другой стороны, свидетельствует о возможности рассмотрения процессов в этих подсистемах отдельно. При этом взаимосвязь между отдельными подсистемами выражается в соотношениях между связующими параметрами и организуется на основе выходных характеристик или показателей, выявленных в результате моделирования подсистем.

В настоящей работе рассматриваются упрощенные модификации моделей компонентов гибридной системы, обеспечивающие отображение их основных энергетических характеристик. Данный класс моделей позволяет использовать численные методы решения с итерационным шагом порядка 1 сек, а следовательно, обеспечивается возможность исследования энергетических характеристик системы на длительных интервалах времени от десятков часов и суток.

Математические модели компонентов ФЭС

Модель солнечной радиации

Величина первичной солнечной энергии, которая доступна для преобразования ФЭС, определяется интенсивностью суммарного солнечного излучения в месте ее установки и зависит от географических координат месторасположения ФЭС, пространственной ориентации СБ, а также от внешних метеорологических факторов: температуры воздуха, уровня облачности, коэффициента отражения земной поверхности.

Большинство метеорологических факторов имеют стохастическую природу, а их колебания во времени содержат составляющие от долей секунды и, по меньшей мере, до нескольких десятилетий, что практически исключает возможность их достоверного определения теоретическими методами. В настоящее время при проектировании ФЭС преимущественное распространение получили вероятностные (статистические) методы расчета радиационных характеристик [9, 10], которые используют в качестве исходных данных специальные климатические справочники или электронные базы, составленные по результатам многолетних метеорологических наблюдений.

Суммарная солнечная радиация на произвольную ориентированную по углу наклона β и азимуту γ приемную поверхность рассчитывается по методике, предложенной В.У.Н. Liu, R.C. Jordan [11]:

$$I_{\text{сум}}^{\beta\gamma} = I_{\text{пр}}^{\beta\gamma} + I_{\text{расс}}^{\beta\gamma} + I_{\text{отр}}^{\beta\gamma} = I_{\text{пр}}^{\text{гор}} \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} + I_{\text{расс}}^{\text{гор}} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho I_{\text{сум}}^{\text{гор}} \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (1)$$

где $I_{\text{сум}}^{\beta\gamma}$, $I_{\text{пр}}^{\beta\gamma}$, $I_{\text{расс}}^{\beta\gamma}$, $I_{\text{отр}}^{\beta\gamma}$ – значения суммарной, прямой, рассеянной от облаков и аэрозолей и отраженной от земной поверхности радиации на наклонную поверхность, соответственно; $I_{\text{пр}}^{\text{гор}}$, $I_{\text{расс}}^{\text{гор}}$, $I_{\text{сум}}^{\text{гор}}$ – значения прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность; θ – угол между направлением потока солнечного излучения к поверхности и нормалью к ней; θ_z – зенитный угол Солнца; ρ – альbedo земной поверхности.

Величина угла θ определяется из решения уравнения [12]:

$$\cos \theta = (A - B) \sin \delta + [C \sin \omega + (D + E) \cos \omega] \cos \delta. \quad (2)$$

Коэффициенты A , B , C , D , E вычисляются по формулам:

$$A = \sin \varphi \cos \beta; \quad B = \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma;$$

$$C = \sin \beta \sin \gamma; \quad D = \cos \varphi \cos \beta; \quad E = \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma,$$

где φ – широта местности в точке установки приемной площадки; δ – угол склонения Солнца; β – угол наклона приемной площадки к горизонтальной плоскости; γ – азимутальный угол установки приемной площадки (при направлении на Юг $\gamma=0^\circ$, при отклонении к Востоку γ считается положительным, при отклонении к Западу – отрицательным); ω – часовой угол Солнца.

Зенитный угол Солнца определяется по выражению:

$$\theta_z = \arccos[\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega], \quad \text{град} \quad (3)$$

Угол высоты подъема Солнца над горизонтом h вычисляется по формуле:

$$h = 90^\circ - \theta_z. \quad (4)$$

Азимутальный угол положения Солнца Az является решением уравнения:

$$\cos Az = \frac{\sin h \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h \cos \varphi}. \quad (5)$$

Часовой угол вычисляется по формуле:

$$\omega = 15(t - 12 - T_{\text{вб}} - \Delta T_{\text{UTC}}) + \psi, \quad \text{град} \quad (6)$$

где t – текущее официальное местное время, час; ΔT_{UTC} – разница между местным официальным временем и средним временем по Гринвичу, час; ψ – географическая долгота точки размещения приемной площадки, град.

Временная поправка на уравнение времени определяется по формуле:

$$T_{\text{вб}} = \frac{1}{60} [9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B)], \quad \div \quad (7)$$

где $B=B_0(N-81)$, град.; $B_0=360/365$; N – номер календарного дня с начала года (для 01.01 – $N=1$, для 02.01 – $N=2$ и т. д.).

Угол склонения находится по формуле Купера [12]:

$$\delta = 23,45 \sin[B_0(N + 284)], \quad \text{град} \quad (8)$$

Углы восхода ω_{sr} и заката ω_{ss} Солнца по солнечному времени определяются из выражений:

$$\omega_{\text{sr}} = 0 - \arccos[-\text{tg} \varphi \text{tg} \delta];$$

$$\omega_{\text{ss}} = 0 + \arccos[-\text{tg} \varphi \text{tg} \delta]. \quad (9)$$

Для учета реальных характеристик солнечной радиации, приходящей на определенную территорию, при моделировании используются средние для заданного месяца значения индекса прозрачности атмосферы K_T , полученные из базы данных космического агентства США NASA SSE [13] за 22-летний период наблюдений с 1983 по 2004 гг. При этом считается, что индекс прозрачности для текущих суточных значений солнечной радиации равен его среднесуточному значению для данного месяца:

$$K_T = I_{\text{сум}}^{\text{гор}} / I_0, \quad (10)$$

где I_0 – внеатмосферная радиация на горизонтальную поверхность, которая определяется по формуле Спенсера [12]:

$$I_0 = I_{\text{sun}} [1 + 0,033 \cos(B_0 N)] \cos \theta_z, \quad (11)$$

где $I_{\text{sun}}=1367 \text{ Вт/м}^2$ – солнечная постоянная.

Величина рассеянной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность, определяется через диффузный коэффициент K_D , характеризующий долю рассеянной радиации в суммарном излучении:

$$K_D = I_{\text{расс}}^{\text{гор}} / I_{\text{сум}}^{\text{гор}}. \quad (12)$$

Для нахождения K_D используется методология NASA [13], по которой доля рассеянной радиации определяется из системы полиномиальных уравнений в функции от широты местности, индекса прозрачности, часового угла заката и полуденного угла высоты Солнца над горизонтом.

Модель выполнена в виде подсистемы, состоящей из 9 основных функциональных блоков, обеспечивающих решение системы уравнений (1)–(12): 1 – ввод данных, 2, 3 – расчет углов высоты и азимута (захода) Солнца, 4 – расчет солнечного времени восхода (захода) Солнца, 5 – расчет угла θ , 6 – расчет диффузного коэффициента, 7, 8 – расчет прямого и рассеянного солнечного излучения, 9 – расчет часового угла по местному официальному времени.

Возможность исследования быстродействующих процессов изменения солнечной радиации обеспечивается с помощью дополнительного блока имитации разорванной облачности, который может быть включен в модель опционально. Блок построен на базе стандартного генератора случайных чисел и передаточной функции из библиотеки Mat-Lab/Simulink.

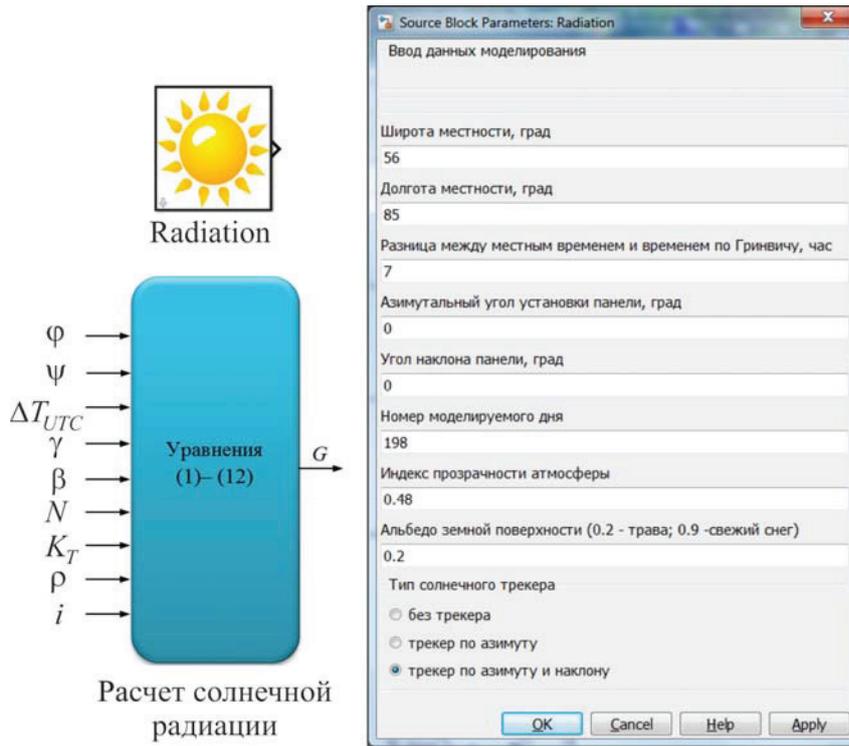


Рис. 2. Модель расчета солнечной радиации в MatLab/Simulink

Fig. 2. Model for calculating the solar radiation intensity in MatLab/Simulink

Блок-схема модели расчета солнечной радиации с окном ввода данных представлена на рис. 2.

Модель позволяет определять текущие значения величины приходящей солнечной радиации G для любого дня года в произвольном географическом месте размещения ФЭС на произвольно ориентированные поверхности, выполнить анализ эффективности применения солнечных трекеров различных типов, провести сравнительную оценку производительности ФЭС по сезонам года.

Для верификации модели использовались многолетние статистические характеристики суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность для ряда населенных пунктов России, представленные в свободном доступе на сайте Мирового центра радиационных данных [14] по актинометрическим станциям, входящих в сеть Всемирной метеорологической организации (WMO). Проведенная серия расчетов показала, что модель прихода солнечной радиации обеспечивает адекватное отображение результатов по расчету солнечных энергетических ресурсов: средняя относительная погрешность модели не превышает 12 %, что вполне пригодно для выполнения инженерных расчетов.

Модель солнечной батареи

Для построения модели солнечной батареи использовалась методика, предложенная A.D. Jones, C.P. Underwood [15], согласно которой максимальная выходная мощность СБ определяется по выражению:

$$P_{PV} = C_{FF} N_{FM} \eta_{conv} G \ln(10^6 G) / T_{FM},$$

где N_{FM} – число ФМ в СБ; C_{FF} – постоянный коэффициент СБ; η_{conv} – КПД преобразователя с контроллером максимальной мощности; G – текущий уровень солнечной радиации, Вт/м²; T_{FM} – текущая температура ФМ.

В отличие от оригинальной методики [15], в настоящей работе для определения величины коэффициента C_{FF} использовалось более точное выражение:

$$C_{FF} = \frac{FFT_{ref}}{G_{ref}} \times \frac{[I_{SC} + k_I (T_{FM} - T_{ref})][V_{OC} + k_V (T_{FM} - T_{ref})]}{\ln(10^6 G_{ref})},$$

где FF – коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики (ВАХ) ФМ; T_{ref} , G_{ref} – значения температуры и освещенности ФМ при стандартных условиях; k_I , k_V – температурные коэффициенты тока короткого замыкания и напряжения холостого хода ФМ, соответственно.

Коэффициент заполнения ВАХ ФМ определялся по данным их технической спецификации:

$$FF = I_{MPP} V_{MPP} / I_{SC} V_{OC},$$

где I_{MPP} , V_{MPP} – паспортные значения тока и напряжения ФМ в точке максимальной мощности при стандартных условиях; I_{SC} , V_{OC} – паспортные значения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода ФМ при стандартных условиях.

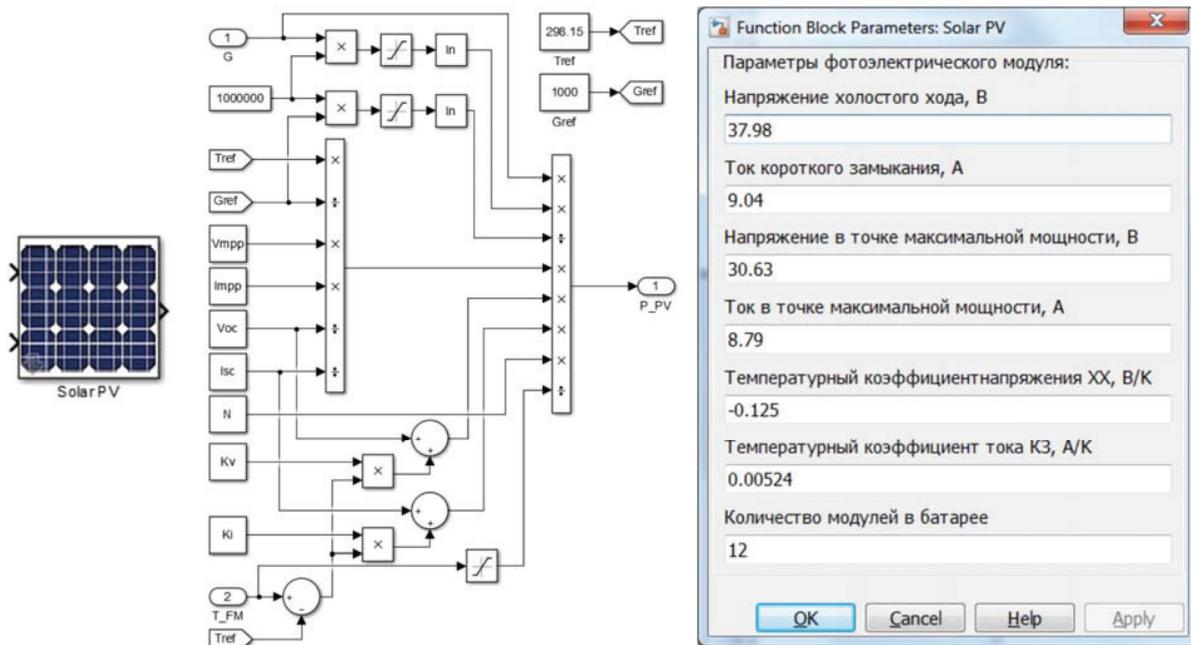


Рис. 3. Модель солнечной батареи в MatLab/Simulink

Fig. 3. Model of the solar battery in MatLab/Simulink

Модель СБ, реализованная в виде подсистемы в MatLab /Simulink, представлена на рис. 3.

Внутренние параметры модели СБ определяются данными технической спецификации ФМ и их количеством, входными переменными модели являются текущие значения величины солнечной радиации G и температуры поверхности ФМ T_{FM} , единственная выходная переменная определяет максимальную активную мощность P_{PV} , которую можно снять с СБ в текущих условиях эксплуатации.

Для верификации предложенной модели СБ использовалась модель фотоэлектрического преобразователя, представленная в работе [16], и данные технической спецификации ряда ФМ моно- и поликристаллического типов.

Модель показала хорошее соответствие результатов расчетов с данными изготовителей, что обеспечивает высокую точность имитации в окрестностях точки максимальной мощности. Это позволяет использовать модель СБ для разработки эффективных алгоритмов контроллеров ФЭС, совершенствования схемотехники преобразовательных устройств, прогнозирования выработки электроэнергии, анализа рабочих режимов фотоэлектрических систем.

Модель суточного хода температуры воздуха

Доминирующее влияние на энергетические характеристики фотоэлектрических преобразователей оказывает величина электрической нагрузки, интенсивность солнечного излучения, температура окружающей среды и скорость ветра.

Для ФЭС, расположенных в высоких северных широтах, к которым относятся большинство территорий России, внешние метеорологические факторы могут оказывать существенное влияние на производительность СБ, и их желательно учитывать. Наиболее просто определяются среднемесячные и среднесуточные значения температуры окружающего воздуха и скорости ветра, которые являются независимыми величинами от параметров проектируемой электроустановки. Исходными данными для их определения являются статистические данные метеорологических наблюдений, которые можно получить из архивов метеорологических сайтов [17, 18].

Необходимо отметить, что в отличие от скорости ветра, изменения температуры в северных широтах имеют явно-выраженный суточный ход, для определения которого можно использовать выражение:

$$T(t) = \bar{T} + 0,5\Delta T \cos[2\pi(t_{\text{мест}} - t_{\text{max}})/t_{\text{пер}}],$$

где \bar{T} – среднесуточная температура воздуха, °С; ΔT – суточная амплитуда температуры воздуха, °С; $t_{\text{пер}}$ – период изменения температуры воздуха, ч; t_{max} – местное время максимума температуры, ч; $t_{\text{мест}}$ – локальное (местное) солнечное время, ч.

Модель суточного хода температуры применима для любого дня года и любого населенного пункта с использованием статистических данных метеонаблюдений близлежащей метеостанции. Модель реализована в виде подсистемы и позволяет всего по 3 входным параметрам получить временную зависимость вариации температуры воздуха для рассматриваемого дня года, рис. 4.

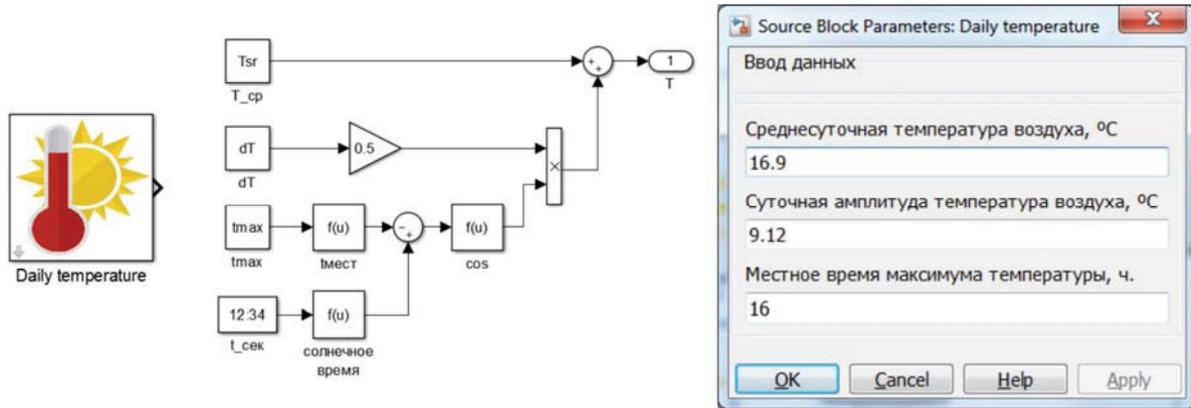


Рис. 4. Модель суточного хода температуры в MatLab/Simulink

Fig. 4. Model of the diurnal temperature variation in MatLab/Simulink

Модель температуры поверхности фотоэлектрического модуля

Кроме окружающего воздуха на температурный режим ФМ оказывают непосредственное влияние: энергия излучения, поступающая на поверхность ФМ вместе с солнечными лучами, и внутренние источники теплоты, образующиеся за счет электрических потерь в солнечных элементах и контактных сопротивлениях. Рабочая температура ФМ при эксплуатации устанавливается в результате теплообмена его поверхности с окружающей средой, имеющего конвективно-лучистый характер. Определение текущей температуры ФМ теоретическими методами практически невозможно из-за влияния на процесс множества самых разнообразных факторов: коэффициентов теплоотдачи и поглощения излучения материалов модуля, силы и направления ветра, соотношения площадей лицевой и тыльной поверхностей модуля и т. п. Результаты эксплуатации ФЭС показывают, что превышение температуры ФМ над температурой внешней среды при высоких значениях солнечной инсоляции может достигать 30 °С, поэтому учет реальной температуры ФМ в эксплуатацион-

ных условиях является обязательным. В связи со сложностью теоретического определения температуры ФМ используются эмпирические зависимости, полученные в реальных условиях эксплуатации ФЭС [19–21], адаптированные к определенным климатическим условиям.

В результате обработки экспериментальных данных, полученных в условиях эксплуатации кремниевых ФМ в Сибири, определена аппроксимирующая зависимость превышения температуры поверхности ФМ от величины солнечного излучения G и средней скорости ветра V , реализованная в MatLab/Simulink (рис. 5):

$$\Delta T_{FM} = 0,0283G - 0,0058GV + 0,0005GV^2, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Вследствие инерции тепловых процессов температура ФМ не может изменяться мгновенно, поэтому в состав модели включено инерционное звено, реализованное на базе стандартного блока передаточной функции.

Модель аккумуляторной батареи

Для моделирования аккумуляторной батареи (АБ) использован метод, предложенный Olivier

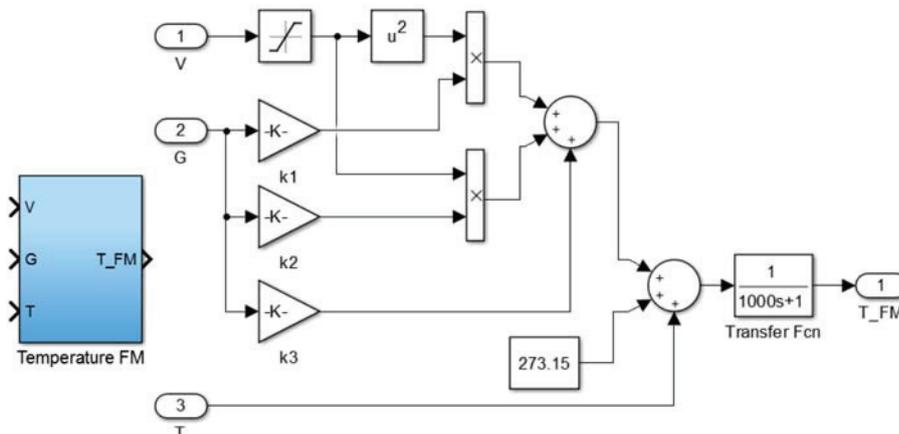


Рис. 5. Модель расчета температуры фотоэлектрических модулей в MatLab/Simulink

Fig. 5. Model for calculating the photovoltaic module temperature in MatLab/Simulink

Tremblay и Louis-A. Dessaint [22, 23]. Модель АБ основана на обобщенном соотношении Шефферда и задается уравнением:

$$V_{\text{batt}} = E_0 - Ri - \frac{KQ}{(Q - \int idt)} + A \exp(-B \int idt), \quad (13)$$

где $\int idt$ – фактический уровень заряда АБ (А·ч); R – внутреннее сопротивление АБ (Ом); V_{batt} – напряжение АБ (В); i – ток батареи (А); A, B – коэффициенты, характеризующие величину падения напряжения во время экспоненциальной зоны разряда (В) и обратную величину емкости АБ в конце экспоненциальной зоны разряда (А·ч)⁻¹; K – поляризационное сопротивление (Ом).

Модель Шефферда [24] содержит нелинейный член, характеризующий величину напряжения (поляризационное напряжение), зависящего от амплитуды тока и фактического состояния заряда АБ. В реальной АБ в режиме холостого хода ее напряжение возрастает практически до ЭДС холостого хода E_0 , а при появлении разрядного тока напряжение резко падает. Наличие нелинейного члена в уравнении позволяет найти реальный ток разряда АБ, однако при численном решении это приводит к алгебраическому циклу и делает модель неустойчивой.

В используемой модели АБ (13) величина напряжения однозначно определяется значениями разрядного тока и фактическим уровнем заряда батареи SOC , чем обеспечиваются достаточно точные результаты моделирования режимов разряда и заряда АБ различных типов, в том числе и используемых в энергетических системах с возобновляемыми источниками энергии: никель-кадмиевых, свинцово-кислотных и литий-ионных.

На рис. 6 используются следующие обозначения: E_{full} – напряжение полностью заряженной АБ (В); E_{exp} – напряжение АБ в конце экспоненциальной зоны разряда (В); E_{nom} – номинальное напряжение АБ (В); Q_{exp} – емкость АБ в конце экспонен-

циальной зоны разряда (А·ч); Q_{end} – остаточная емкость АБ при номинальном напряжении (А·ч).

Параметры уравнения (13) определяются по разрядной характеристике АБ, заданной производителем, а их физический смысл виден из рис. 6.

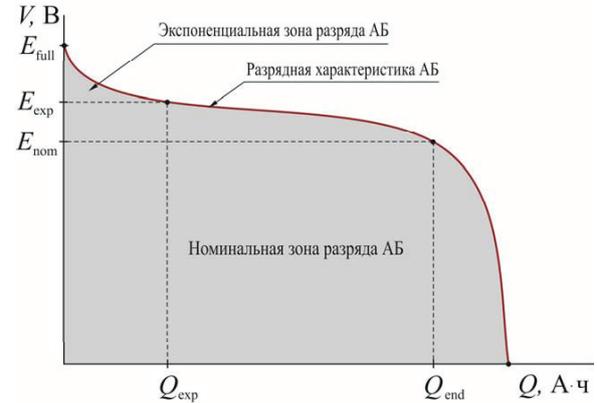


Рис. 6. Типовая разрядная характеристика АБ

Fig. 6. Typical discharge characteristics of AB

В среде Simulink АБ моделируется с помощью управляемого источника напряжения, включенного последовательно с постоянным сопротивлением, рис. 7.

Модель выполнена в виде отдельной подсистемы с возможностью ввода основных параметров через диалоговое окно, что позволяет легко ее модифицировать и использовать для исследования характеристик АБ различных типов, а также для построения моделей банка АБ и фотоэлектрических систем произвольной конфигурации на их основе.

Модели преобразователей

В принятой схеме построения ФЭС (рис. 1) используются два типа силовых полупроводниковых преобразователей: преобразователь постоянного напряжения и выходной инвертор.

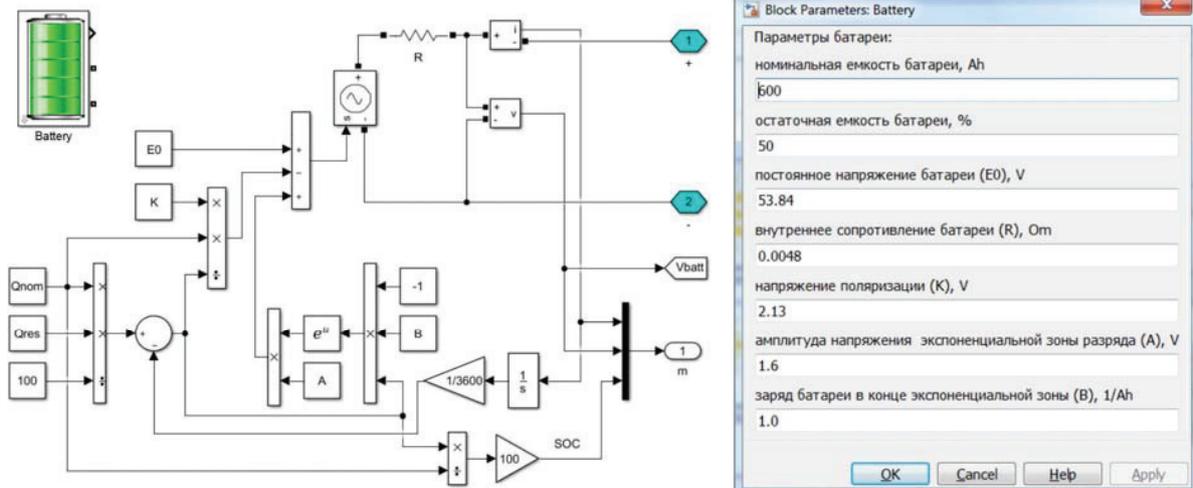


Рис. 7. Компьютерная реализация модели АБ в MatLab/Simulink

Fig. 7. Computer implementation of AB model in MatLab/Simulink

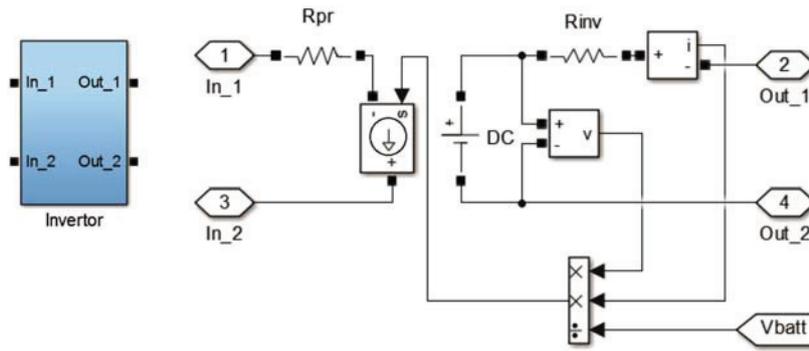


Рис. 8. Упрощенная модель инвертора в MatLab/Simulink

Fig. 8. Simplified model of the inverter in MatLab/Simulink

Для исследования энергетических характеристик ФЭС построены «упрощенные» энергетические модели преобразователей на базе идеальных источников тока и напряжения. На рис. 8 представлена модель выходного инвертора.

Идеальный источник постоянного напряжения DC подключен к силовым выводам (Out1, Out2) через последовательное активное сопротивление R_{inv} , обеспечивающее учет внутренних потерь в инверторе. Измерительные трансформаторы тока и напряжения в выходной цепи инвертора обеспечивают расчет потребляемой нагрузкой активной мощности и вычисления текущих значений тока, который будет сниматься с зажимов АБ. Для учета потерь в соединительном кабеле от АБ во входную цепь инвертора включено активное сопротивление R_{pr} .

Аналогичным образом построена модель преобразователя постоянного напряжения. Вычислительные тесты моделей преобразователей подтвердили их работоспособность в пределах возможного диапазона изменения входных и выходных параметров.

Модель электрической нагрузки

Для моделирования электрической нагрузки использовалась вероятностно-статистическая модель, задаваемая выражением:

$$P_{pi} = \bar{P}_i + \beta\sigma(P_i),$$

где P_{pi} , \bar{P}_i – расчетная активная нагрузка и математическое ожидание нагрузки на i -м часе суточного графика; β – коэффициент надежности расчета, который определяет вероятность, с которой случайные значения нагрузки останутся меньше принятого расчетного значения P_{pi} ; $\sigma(P_i)$ – среднеквадратичное отклонение для i -й ступени суточного графика.

В расчетах принят нормальный закон распределения нагрузок, в соответствии с которым при $\beta=3$ вероятность превышения расчетной нагрузки составляет 99,87 %.

Базовой моделью электрической нагрузки служил типовой график активной нагрузки сельских жилых домов, типичный для автономных потребителей [25, 26].

Компьютерная модель нагрузки построена на базе управляемого источника тока (рис. 9), входным параметром модели служила величина выходного напряжения инвертора, выходными параметрами являлись ток и напряжение на сборных шинах потребителя электроэнергии. Суточный график активной мощности задавался с помощью стандартного блока библиотеки Simulink Signal Builder.

Для контроля выходных электрических параметров ФЭС в схему модели включен измерительный порт m , обеспечивающий измерение текущих действующих значений тока, напряжения и активной мощности.

Модель фотоэлектрической станции

Разработанная имитационная модель ФЭС с накопителем энергии состоит из шести основных компонентов: модель прихода солнечной радиации, СБ, преобразователь постоянного напряжения (контроллер заряда), АБ, инвертор, электрическая нагрузка. Все модели компонентов выполнены в виде отдельных подсистем в программной среде MatLab/Simulink, обладают свойством масштабирования.

Компьютерная реализация модели ФЭС с контрольно-измерительными приборами представлена на рис. 10. Она была тщательно протестирована серией расчетов, которые подтвердили ее работоспособность и адекватность.

Результаты моделирования

Опишем результаты применения предложенной имитационной модели для анализа рабочих режимов ФЭС, территориально расположенной в г. Томске (географические координаты 56° с.ш., 85° в.д.) для характерного летнего (21 июня) дня года.

В качестве объекта анализа принята схема ФЭС в минимальной конфигурации. В ее состав входит СБ, состоящая из 12 фотоэлектрических модулей поликристаллического типа JAP6-60-260 [27], номинальной мощностью 260 Вт, соединенных в массив из 3 параллельных цепочек по 4 модуля в каждой. АБ построена на базе 12 гелевых свинцо-

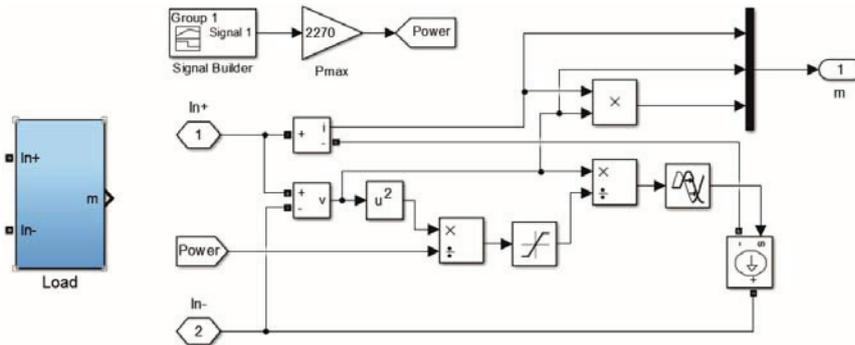


Рис. 9. Компьютерная модель электрической нагрузки

Fig. 9. Computer model of the electrical load

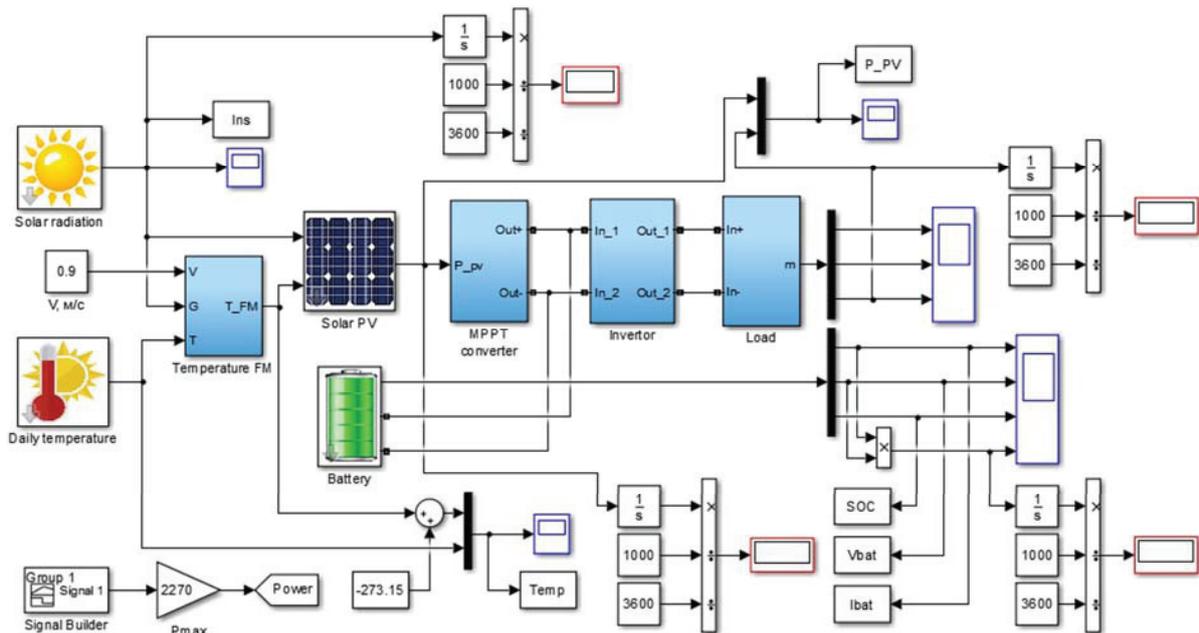


Рис. 10. Модель ФЭС в MatLab/Simulink

Fig. 10. Model of the photovoltaic plant in MatLab/Simulink

во-кислотных аккумуляторов Delta GX 12–200 [28]. Величина номинального напряжения АБ принята равной $U_{ном}=48$ В, что определяет вид ее электрической схемы: 3 параллельные ветви с 4 последовательно соединенными аккумуляторами. В рассматриваемой ФЭС обеспечивается автоматическая ориентация СБ на Солнце по азимуту и углу наклона.

Исходными данными моделирования являлись метеорологические сводки для г. Томска, полученные по результатам многолетних наблюдений. При выполнении расчетов приняты средние значения температуры окружающего воздуха и скорости ветра, полученные в результате обработки статистических данных за 2005–2016 гг. по метеостанции № 29430 г. Томска, представленные в свободном доступе на сайте «Расписание погоды» [17]. Средние значения альbedo земной поверхности определены по данным научно-прикладного справочника по климату СССР [29].

Для рассматриваемого дня года среднесуточная температура воздуха составила $16,9$ °С, амплитуда суточного хода температуры – $9,1$ °С, средняя скорость ветра – $0,9$ м/с, местное время максимума температуры – 16 часов дня, альbedo земной поверхности – $0,22$.

На рис. 11 приведены расчетные временные графики режимных параметров ФЭС для рассматриваемого дня. На графиках слева представлены суточные изменения величины суммарной солнечной радиации G , приходящей на единичную, ориентированную на Солнце, приемную поверхность в условиях облачного неба, температуры воздуха T_{air} и поверхности ФМ T_{FM} , активной мощности, генерируемой СБ P_{PV} , и потребляемой нагрузкой P_{load} . На графиках справа представлены текущие значения параметров АБ: ток I_{batt} , напряжение V_{batt} и уровень заряда SOC.

Анализ результатов моделирования позволил провести детальную оценку энергетического баланса ФЭС.

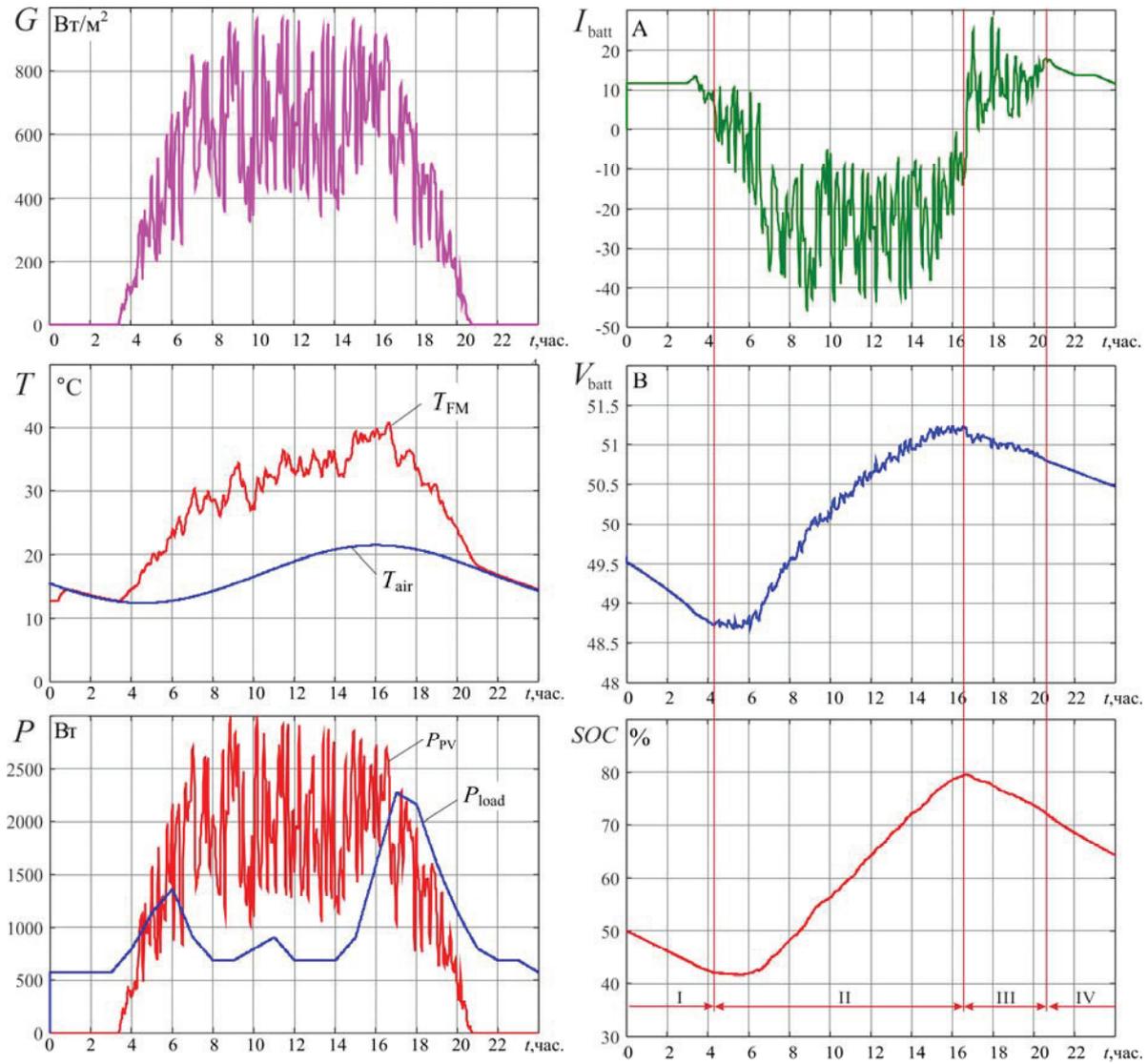


Рис. 11. Расчетные временные графики режимных параметров ФЭС в характерный летний день года

Fig. 11. Estimated temporal diagrams of the FES operating parameters on a typical summer day

Общее количество энергии, которая может быть сгенерирована СБ за сутки (без учета температурного дрейфа вольт-амперных характеристик ФМ), найдено через расчетные значения солнечной радиации $G(t)$ и данные технической спецификации, используемых ФМ JAP6-60-260 [27]:

$$W_{PV} = \eta_{FM} S_{FM} N_{FM} \int_0^{24} G(t) dt = 31,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где $\eta_{FM}=0,159$ – КПД фотоэлектрического модуля; $S=1,63 \text{ м}^2$ – площадь ФМ; $N_{FM}=12$ – количество ФМ в солнечной батарее.

Для рассматриваемого дня года расчетная суточная выработка электрической энергии СБ составила 31,9 кВт·ч, что превысило суточную зимнюю выработку более чем в 4 раза. Максимально возможное количество энергии, которую может получить потребитель от данной ФЭС за сутки в рассматриваемый день:

$$W_{load} = W_{PV} \eta_1 \eta_2 \eta_3 = 31,9 \cdot 0,95 \cdot 0,85 \cdot 0,9 = 23,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

В расчетах приняты средние значения КПД преобразовательных устройств – контроллера заряда $\eta_1=0,95$, аккумуляторов – $\eta_2=0,85$, инвертора – $\eta_3=0,9$.

Средняя мощность нагрузки объекта электропитания составила:

$$P_{\text{нб}} = W_{load} / 24 = 23200 / 24 = 970 \text{ Вт.}$$

Для типового графика электрических нагрузок децентрализованного потребителя максимальная суточная нагрузка равна:

$$P_{\text{max}} = K_m P_{\text{нб}} = 2,34 \cdot 970 = 2270 \text{ Вт,}$$

где $K_m=2,34$ – коэффициент максимума нагрузки.

В выполненных расчетах принят типовой суточный график нагрузок децентрализованных потребителей с максимальной нагрузкой $P_{\text{max}}=2270 \text{ Вт}$.

Результаты моделирования хорошо отображают характер физических температурных процессов при эксплуатации ФЭС. Из рис. 11 видно, что в часы суток, когда отсутствует поступление солнечной радиации на поверхность Земли, T_{FM} равна температуре окружающей среды, при освещении СБ ее температура увеличивается, причем тем больше, чем сильнее интенсивность поступающего солнечного излучения. Максимальное значение T_{FM} достигается около 16 часов дня, при этом превышение T_{FM} над температурой окружающего воздуха доходит до 19°C .

Из представленных на рис. 11 графиков видно, что при принятом соотношении мощностей обеспечивается полное покрытие потребляемой энергии, энергией, генерируемой СБ. Однако для бесперебойного обеспечения потребителя электрической энергией в данных условиях необходимо, чтобы уменьшение емкости АБ в темное время суток успевало восполниться за время светового дня, для чего был проведен тщательный анализ энергетических процессов в АБ. Для удобства анализа на правых графиках (рис. 11) выделены 4 характерные режимные зоны работы ФЭС: зоны I и IV соответствуют режимам питания потребителя от АБ, в зоне II генерируемой мощности СБ достаточно для полного покрытия электрической нагрузки потребителя и заряда АБ, в зоне III нагрузка частично покрывается за счет СБ, и частично за счет АБ. Для реализации данного режима выходной инвертор ФЭС должен уметь «подмешивать» энергию из АБ к энергии, снимаемой с зажимов СБ.

Остаточная емкость АБ на начало суток принята равной $\text{SOC}=50\%$. За время работы I зоны уровень заряда АБ уменьшается до 42% . Во время заряда АБ (II зона) их остаточная емкость увеличивается с 42 до 80% , максимальный ток заряда не превышает 45 А , что меньше допустимого тока в 60 А для трех параллельных цепочек по 4 последовательных аккумулятора в каждой. За время работы в III и IV зонах уровень заряда АБ уменьшается до 65% , что больше первоначально заданного, и свидетельствует о том, что энергия, затраченная АБ на питание нагрузок потребителя, успевает полностью восполниться за сутки.

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что для принятых условий эксплуатации данная конфигурация ФЭС обеспечивает бесперебойное электроснабжение потребителя с максимальной расчетной нагрузкой 2270 Вт , и при условии

допустимого 50% -го разряда АБ обеспечивается 12-ти часовое резервирование потребляемой мощности.

Аналогичные расчеты, выполненные для других характерных дней года, позволили выбрать тип и согласовать установленную мощность основного оборудования ФЭС и нагрузки, что обеспечило гарантированное электроснабжение потребителем электрической энергией.

Заключение

Разработана оригинальная имитационная модель ФЭС, обеспечивающая исследование ее рабочих режимов в реальных условиях эксплуатации. В ней учтено влияние внешних климатических факторов на энергетические характеристики солнечной батареи, что повышает точность прогнозных расчетов в выработке электроэнергии для рассматриваемого региона.

Исходными данными моделирования являются широта и долгота местности, среднесуточная скорость ветра в месте установки ФЭС, индекс прозрачности атмосферы, альbedo земной поверхности, номер дня года, азимутальный и вертикальный углы установки СБ, тип солнечного трекера, среднесуточная температура воздуха и ее суточная амплитуда, местное время максимума температуры, технические характеристики ФМ.

В процессе моделирования рассчитываются временные тренды интенсивности солнечной радиации, суточная вариация температуры воздуха, текущая температура поверхности фотоэлектрических модулей и их энергетические характеристики: ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, коэффициент заполнения ВАХ и выходная электрическая мощность.

Полученные при моделировании режимов ФЭС результаты обеспечивают возможность аргументированного выбора рационального режима эксплуатации электростанции (круглогодичный или сезонный), требуемой емкости накопительных устройств, установленной мощности и номинального напряжения солнечной батареи, тип солнечного трекера, сечений проводников и мощности преобразователей, а также определения эффективных алгоритмов управления энергетическим комплексом.

Работа выполнена при финансовой поддержке министерства образования и науки Российской Федерации (контракт № 02.G25.31.0190).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chauhan A., Saini R.P. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – V. 38. – P. 99–120.
2. Shivarama K.K., Sathish K.K. A review on hybrid renewable energy systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – V. 52. – P. 907–916.
3. Badwawi R.A., Abusara M., Mallick T. A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System // *Smart Science*. – 2015. – V. 3 (3). – P. 127–138.
4. Kusakana K., Vermaak H.J. Hybrid diesel generator/renewable energy system performance Modeling // *Renewable Energy*. – 2014. – V. 67. – P. 97–102.
5. Upadhyay S., Sharma M.P. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – V. 38. – P. 47–63.
6. Handbook of photovoltaic science and engineering / ed. by A. Luque, S. Hegedus. – Southern Gate, Chichester England, John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 1179 p.
7. Practical handbook of photovoltaics: Fundamentals and applications / ed. by T. Markvart, L. Castafier. – Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2012. – 1244 p.
8. Обухов С.Г., Плотников И.А. Модель солнечной панели в MATLAB SIMULINK // *Альтернативная энергетика и экология: Международный научный журнал*. – 2014. – № 21 (161). – С. 51–59.
9. Солнечная энергетика / В.И., Виссарионов Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Калинин / под ред. В.И. Виссарионова. 2-е изд., стер. – М.: ИД МЭИ, 2011. – 276 с.
10. Климатические данные для возобновляемой энергетики России (база климатических данных) / О.С. Попель, С.Е. Фрид, С.В. Киселева, Ю.Г. Коломиец, Н.В. Лисицкая. – М.: Изд-во МФТИ, 2009. – 56 с.
11. Liu B.Y.H., Jordan R.C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator // *ASHRAE Journal*. – 1961. – V. 3. – P. 53–59.
12. Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. fourth edition. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013. – 910 p.
13. The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set. URL: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> (дата обращения: 14.03.2017).
14. World Radiation Data Centre. URL: <http://wrdc.mgo.rssi.ru/> (дата обращения: 14.03.2017).
15. Jones A.D., Underwood C.P. A thermal model for photovoltaic systems // *Solar Energy*. – 2001. – V. 70 (4). – P. 349–359.
16. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Kryuchkova M. Simulation of Electrical Characteristics of a Solar Panel // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – V. 132: *Modern Technologies for Non-Destructive Testing*. – 012017. – 6 p.
17. Расписание погоды. URL: <http://www.rp5.ru/> (дата обращения: 14.03.2017).
18. Погода России. Архив погоды. URL: <http://meteo.infospa.ru/> (дата обращения: 14.03.2017).
19. Al Riza D.F., Haq Gilani S.I., Aris M.S. Hourly Solar Radiation Estimation Using Ambient Temperature and Relative Humidity Data // *International Journal of Environmental Science and Development*. – 2011. – V. 2 (3). – P. 188–193.
20. Meyer E.L., van Dyk E.E. Development of energy model based on total daily irradiation and maximum ambient temperature // *Renewable Energy*. – 2000. – V. 21 (1). – P. 37–47.
21. Muzathik A.M. Photovoltaic Modules Operating Temperature Estimation Using a Simple Correlation // *International Journal of Energy Engineering*. – 2014. – V. 4(4). – P. 151–158.
22. Tremblay O., Dessaint L.-A., Dekkiche, A.-I. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles / *Vehicle Power and Propulsion Conference*. VPPC 2007. – P. 284–289.
23. Tremblay O., Dessaint L.-A. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications // *World Electric Vehicle Journal*. – 2009. – V. 3. – P. 1–10.
24. Shepherd C.M. Design of Primary and Secondary Cells. P. 2. An equation describing battery discharge // *Journal of Electrochemical Society*. – 1965. – V. 112. – P. 657–664.
25. РД 34.20.178. Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства / Методические указания по расчету электрических нагрузок в сетях 0,38–110 кВ сельскохозяйственного назначения. – М.: Всесоюзный государственный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Сельэнергопроект», 1985.
26. Обухов С.Г., Хошнау З.П. Прогнозирование режимов потребления электрической энергии автономными энергетическими системами // *Электрические станции*. – 2012. – № 11. – С. 43–47.
27. JA SOLAR. URL: <http://www.jasolar.com/> (дата обращения: 14.03.2017).
28. Delta. URL: <http://www.delta-batt.com/> (дата обращения: 14.03.2017).
29. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Выпуск 20. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. – 718 с.

Поступила 28.04.2017 г.

Информация об авторах

Обухов С.Г., доктор технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Плотников И.А., кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.311.25: 621.311.29

SIMULATION MODEL OF OPERATION OF AUTONOMOUS PHOTOVOLTAIC PLANT UNDER ACTUAL OPERATING CONDITIONS

Sergey G. Obukhov¹,
serob99@mail.ru

Igor A. Plotnikov¹,
igorplt@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. Solar photovoltaic technology is one of the most rapidly growing renewable sources of electricity that has practical application in various fields of human activity due to its high availability, huge potential and environmental compatibility. The most serious technical problem of autonomous energy systems with renewable sources is the necessity to align the modes of energy generation and consumption that requires a reliable determination of energy balance with a high temporal sampling. Determination of energy characteristics under actual operating conditions is relevant due to nonlinearity of the main PVP element characteristics and their strong dependence on the external meteorological factors of stochastic nature.

The study aims to develop a simulation model of an autonomous photovoltaic power plant, which provides simulation of its operation under actual operating conditions.

Methods. Mathematical and computer simulation is implemented in the MatLab/Simulink software environment.

Results. A simulation model of the autonomous photovoltaic plant was developed. The model comprises six main components: model of the solar radiation arrival, solar cell, DC inverter (charge controller), battery, inverter, and electrical load. All the components are implemented in MatLab/Simulink as separate subsystems and are capable of dimensional scaling to study photovoltaic systems of any configuration. The proposed model considers the influence of external climatic factors on the solar cell energy characteristics to increase the accuracy of the energy generation forecast.

Key words:

Autonomous photovoltaic plant, solar battery, solar radiation, simulation model, MatLab, Simulink.

The research was financially supported by the Ministry of education and Science of the Russian Federation (contract no. 02.G25.31.0190).

REFERENCES

1. Chauhan A., Saini R.P. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 38, pp. 99–120.
2. Shivarama K.K., Sathish K.K. A review on hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 907–916.
3. Badwawi R.A., Abusara M., Mallick T. A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System. *Smart Science*, 2015, vol. 3 (3), pp. 127–138.
4. Kusakana K., Vermaak H.J. Hybrid diesel generator/renewable energy system performance Modeling. *Renewable Energy*, 2014, vol. 67, pp. 97–102.
5. Upadhyay S., Sharma M.P. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 38, pp. 47–63.
6. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Ed. by A. Luque, S. Hegedus. Southern Gate, Chichester England, John Wiley & Sons Ltd, 2003. 1179 p.
7. *Practical handbook of photovoltaics: Fundamentals and applications*. Ed. by T. Markvart, L. Castafier. Hoboken, John Wiley & Sons Inc., 2012. 1244 p.
8. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Model of Solar Module in MATLAB SIMULINK. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2014, no. (21), pp. 51–59. In Rus.
9. Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetsova V.A., Malinin N.K. *Solnechnaya ehnergetika* [Solar energy]. Ed. By V.I. Vissarionov. Moscow, MEHI Publ. house, 2011. 276 p.
10. Popel O.S., S.E. Frid, S.V. Kiseleva, Yu.G. Kolomiets, N.V. Lisitskaya. *Klimaticheskie dannye dlya vozobnovlyemoy ehnergetiki Rossii (baza klimaticheskikh dannyykh)* [Climatic data for renewable energy in Russia (data base of climatic data)]. Moscow, MFTI Press, 2009. 56 p.
11. Liu B.Y.H., Jordan R.C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator. *ASHRAE Journal*, 1961, vol. 3, pp. 53–59.
12. Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2013. 910 p.
13. *The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set*. Available at: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> (accessed 14 March 2017).
14. *World Radiation Data Centre*. Available at: <http://wrdc.mgo.rssi.ru/> (accessed 14 March 2017).
15. Jones A.D., Underwood C.P. A thermal model for photovoltaic systems. *Solar Energy*, 2001, vol. 70 (4), pp. 349–359.
16. 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: Modern Technologies for Non-Destructive Testing, 012017, 6 p.
17. *Raspisanie pogody* [Weather forecast]. Available at: <http://www.rp5.ru/> (accessed 14 March 2017).
18. *Pogoda Rossii* [Weather in Russia]. Available at: <http://meteo.infospace.ru/> (accessed 14 March 2017).
19. Al Riza D.F., Haq Gilani S.I., Aris M.S. Hourly Solar Radiation Estimation Using Ambient Temperature and Relative Humidity Data. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2011, vol. 2 (3), pp. 188–193.
20. Meyer E.L., van Dyk E. E. Development of energy model based on total daily irradiation and maximum ambient temperature. *Renewable Energy*, 2000, vol. 21 (1), pp. 37–47.

21. Muzathik A.M. Photovoltaic Modules Operating Temperature Estimation Using a Simple Correlation. *International Journal of Energy Engineering*, 2014, vol. 4 (4), pp. 151–158.
22. Tremblay O., Dessaint, L.-A., Dekkiche, A.-I. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles. *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007. pp. 284–289.
23. Tremblay O., Dessaint, L.-A. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. *World Electric Vehicle Journal*, 2009, vol. 3, pp. 1–10.
24. Shepherd C.M. Design of Primary and Secondary Cells – Part 2. An equation describing battery discharge. *Journal of Electrochemical Society*, 1965, vol. 112, pp. 657–664.
25. RD 34.20.178. *Rukovodyashchie materialy po proektirovaniyu elektrosnabzheniya selskogo khozyaystva. Metodicheskie ukazaniya po raschetu elektricheskikh nagruzok v setyakh 0,38–110 kV selskokhozyaystvennogo naznacheniya* [RD 34.20.178. Guiding materials in developing power supply in agriculture. Manual in calculation of electric loads in 0,38–110 kV networks for agriculture]. Moscow, Selenergoproekt Publ., 1985.
26. Obukhov S.G., Khoshnau Z.P. Prognozirovanie rezhimov potrebleniya ehlektricheskoy energii avtonomnymi energeticheskimi sistemami [Forecasting modes of consuming electric energy by autonomous electric power stations]. *Elektricheskie stantsii*, 2012, no. 11, pp. 43–47.
27. *JA SOLAR Company*. Available at: <http://www.jasolar.com/> (accessed 14 March 2017).
28. *Delta Company*. Available at: <http://www.delta-batt.com//> (accessed 14 March 2017).
29. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye* [Scientific reference book on climate in the USSR. Series 3. Long-term data]. St-Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1993. Iss. 20, 718 p.

Received: 28 April 2017.

Information about the authors

Sergey G. Obukhov, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Igor A. Plotnikov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.