

Оптимизация использования фотоэлектрической (PV) энергии в автономных аккумуляторных системах с помощью стратегии управления зарядкой на основе прогнозов

Утпал Кумар Дас^a, Ашиш Кумар Кармакер^{b,*}

^a Кафедра электротехники и электроники, Даккский инженерно-технологический университет, Газипур 1707, Бангладеш

^b Инженерно-технологический факультет Университета Нового Южного Уэльса (UNSW), Канберра 2610, Австралия

Аннотация. Оптимизация использования фотоэлектрической (PV) энергии в аккумуляторных системах представляет собой сложную задачу из-за непостоянства солнечной активности, КПД батарей и управления сроком их службы. В данной статье предлагается новая стратегия управления зарядкой батарей (BCM) на основе прогнозирования для повышения эффективности использования PV-энергии. В данной схеме зарядки аккумулятора постоянным током/постоянным напряжением (CC/CV) рассматривается цепочка литий-ионных аккумуляторных элементов с различной емкостью и степенью заряда (SOC). Значительные объемы энергии, вырабатываемой PV, часто теряются, поскольку режим CC/CV не может в полной мере использовать доступную мощность для поддержания надлежащей скорости зарядки. Для решения этой задачи предлагаемый алгоритм BCM выбирает оптимальный набор элементов батареи для зарядки в любой заданный момент времени на основе прогнозируемого производства PV электроэнергии, обеспечивая получение максимальной мощности от PV системы. Кроме того, разработана модель прогнозирования на основе регрессии опорных векторов (SVR) для точного прогнозирования производства PV электроэнергии. Результаты показывают, что предлагаемая стратегия BCM обеспечивает общий коэффициент использования 87,47% производимой PV энергии для зарядки батарей при различных погодных условиях.

Ключевые слова: Управление зарядкой батарей (BCM); Энергетическая устойчивость; Максимальное использование PV энергии; Прогнозирование PV мощности; Постоянный ток/постоянное напряжение (CC/CV)

0 Введение

Благодаря своим многообещающим технико-экономическим и экологическим преимуществам, интеграция фотоэлектрических (PV) систем для удовлетворения потребностей в электроэнергии и снижения негативного воздействия глобального потепления растет [1,2]. В 2023 году совокупная мощность солнечных PV систем в мире достигла 1624 ГВт, при этом только в этом году было установлено 447 ГВт новых мощностей, что составляет три четверти от общего объема ввода возобновляемых источников энергии в мировом масштабе [3]. Обилие солнечных ресурсов и быстрый технологический прогресс способствовали широкому распространению и росту фотоэлектрических установок [4]. В современном обществе используются различные конфигурации фотоэлектрических систем, включая подключенные к сети бытовые и общественные солнечные системы [5]. Однако автономные фотоэлектрические системы за прошедшие годы получили значительное признание благодаря своей эффективности в электрификации сельских районов и изолированных регионов [6]. Кроме того, как устойчивый вид транспорта, рост числа электромобилей (ЭМ) увеличил спрос на распределительные сети [7]. Зарядные станции на основе PV помогают управлять спросом на электромобили, обеспечивая получение чистой энергии, одновременно снижая объемы выбросов углерода и затраты на энергию [8]. При интеграции фотоэлектрических элементов в системы зарядки аккумуляторов такие ключевые характеристики, как удельная мощность, отношение мощности к весу и срок службы, делают литий-ионные батареи общераспространёнными [9,10]. Для подзарядки батарей используются различные схемы в зависимости от химического состава батареи [11]. Литий-ионные батареи требуют схемы зарядки

постоянным током/постоянным напряжением (CC/CV), тогда как никелевые батареи требуют только постоянного тока. Поддержание соответствующего зарядного тока и напряжения имеет решающее значение для производительности батареи, поскольку неконтролируемая зарядка может привести к колебаниям напряжения и потерям мощности [12-14]. Управление зарядным током и напряжением в фотоэлектрической аккумуляторной системе представляет собой более сложную задачу из-за неопределенности в производстве солнечной энергии, что затрудняет поддержание этих параметров в оптимальных пределах [15,16].

Nomenclature			
<i>Abbreviations and acronyms</i>		PV	Photovoltaic
Symbol	Meaning	SOC	State of charge
x_i	Input values	EV	Electric vehicle
y_i	Output values	PHEV	Plugin hybrid electric vehicle
L	Lagrange function	BCM	Battery-charging management
k	Kernel function	SVR	Support vector regression
α_i and α_i^*	Lagrange multipliers	CC/CV	Constant current/constant voltage
C	Penalty factor	HRES	Hybrid renewable energy resources
ε	Tolerance margin	nRMSE	Normalized root means square error
γ	Kernel co-efficient	MAPE	Mean absolute percentage error
w	Weight vector	CEMS	Central energy-management system
b	Bias term	MPPT	Maximum power-point tracking
ξ and ξ^*	Slack variables	PV	Photovoltaic
d_{norm}	Normalized data	V2G	Vehicle-to-grid
U_R	Utilization rate		

В периоды пикового спроса возобновляемые источники энергии используются для компенсации избыточного спроса на системы зарядки аккумуляторов [17-19]. В [20] показана подключенная к сети фотоэлектрическая/аккумуляторная система как эффективная альтернатива для удовлетворения спроса на энергию. Однако производство электроэнергии может колебаться из-за неопределенности солнечной радиации и размера фотоэлектрической системы, на которые влияют погодные условия и спрос потребителей [21]. Для смягчения этих неопределенностей [22] разработали систему фотоэлектрических батарей, подключенную к сети, в которой энергия, производимая фотоэлектрическими системами, хранится в батарее в периоды низкой нагрузки и подается в сеть в периоды пиковой нагрузки. Было разработано несколько систем зарядки на основе фотоэлектрических систем, подключенных к сети, в которых батарея заряжается в основном от фотоэлектрической системы или дополняется сетью, когда мощности фотоэлектрической системы недостаточно [23,24]. Эти системы зарядки аккумуляторов представляют собой технические проблемы, включая нарушения напряжения, перегрузки и потери мощности [25,26]. Помимо фотоэлектрических систем, системы «автомобиль-сеть» (V2G) общедоступны для снижения пиковой нагрузки [27,28]. Однако потеря качества аккумуляторов остается критической задачей. Эти аспекты делают системы, не зависящие от сети, наиболее экономически эффективной альтернативой для зарядки аккумуляторов, особенно в отдаленных районах и островных регионах [29].

Многие исследователи предложили гибридные возобновляемые источники энергии (ГВЭИ) в качестве эффективных решений для систем зарядки аккумуляторов [30-33]. ГВЭИ снижают зависимость от отдельных источников и повышают эффективность использования ресурсов [33,34]. Однако внедрение сталкивается с такими сложностями, как высокие первоначальные затраты, сложная системная интеграция и необходимость в передовых стратегиях управления, что приводит к необходимости продолжения работы автономной фотоэлектрической системы. Из-за своих прерывистых свойств автономная зарядка на основе фотоэлектрических систем сталкивается с задачами поддержания оптимальной производительности зарядки [35]. Оптимизация зарядки аккумуляторов с помощью фотоэлектрических систем требует точного прогнозирования солнечной активности [36]. Этот прогноз помогает эффективно управлять зарядкой аккумуляторов и сокращать

потери энергии [37]. Он также способствует эффективному хранению энергии и интерактивному принятию решений в сети, минимизируя зависимость от источников энергии в сети. Однако для точного прогнозирования солнечной активности требуются усовершенствованные модели, учитывающие изменчивость погоды, что является критически важным аспектом оптимизации системы.

Были проведены исследования для определения более эффективных методов управления зарядкой для автономных фотоэлектрических аккумуляторных систем. В [38] была предложена система зарядки, которая поддерживает напряжение постоянного тока и состояние заряда (SOC) в стандартных пределах, одновременно снижая токовую нагрузку на батарею. В [39] был использован метод управления понижающим преобразователем постоянного тока в эффективной автономной системе зарядки на основе фотоэлектрических элементов. В [40] была предложена стратегия управления питанием для автономной системы, в которой конечное состояние заряда было ограничено 99,5 % для предотвращения перезаряда и ухудшения показателей батареи. Обзор литературы показывает, что в предыдущих исследованиях подробно обсуждались и совершенствовались различные важные функции, включая отслеживание максимальной мощности фотоэлектрических систем, управление напряжением постоянного тока, механизмы защиты батареи от повреждений во время зарядки и стратегии управления зарядкой для продления срока службы батареи [41,42]. Однако управление потоком мощности является незаменимым в автономных механизмах зарядки на основе фотоэлектрических систем.

На основе обзора литературы можно выделить следующие задачи и пробелы в оптимизации использования PV энергии при зарядке аккумуляторов с помощью стратегии управления энергопотреблением, основанной на прогнозировании:

- 1) Традиционные схемы зарядки, такие как CC/CV, не позволяют в полной мере использовать доступную мощность солнечных батарей, что приводит к значительным потерям энергии, особенно при изменении погодных условий. Поэтому для оптимальной зарядки аккумулятора необходим точный прогноз выработки солнечной энергии с учетом погодных изменений;
- 2) Несмотря на обширные исследования по совершенствованию систем зарядки аккумуляторов на основе фотоэлектрических элементов, остаются пробелы в интеграции устойчивых методов управления потоком мощности для оптимизации эффективности и надежности системы. Кроме того, практическим подходам к решению задач потока мощности, срока службы батареи и производительности системы в различных условиях эксплуатации уделяется ограниченное внимание;
- 3) Несмотря на обширные исследования систем, подключенных к электросети, автономные фотоэлектрические системы для зарядки аккумуляторов, особенно в отдаленных и изолированных регионах, изучены гораздо меньше. Эти системы сталкиваются с уникальными задачами, такими как прерывистость фотоэлектрической энергии и эффективность системы.

Для решения этих задач в данной статье представлена комплексная стратегия управления зарядкой (BCM) на основе прогнозирования, которая объединяет точное прогнозирование производства PV электроэнергии и оптимизированное использование батарей для повышения эффективности автономных фотоэлектрических систем. В этом процессе была разработана модель прогнозирования на основе SVR с использованием эмпирических данных реальных PV систем для точного прогнозирования производства PV электроэнергии. Система заряжает цепочку литий-ионных батарей с использованием трехступенчатой стратегии зарядки CC/CV, полагаясь исключительно на энергию, производимую фотоэлектрическими системами. Хотя отслеживание точки максимальной мощности (MPPT) обеспечивает максимальное извлечение энергии из фотоэлектрических модулей, оно не гарантирует оптимального использования производимой энергии. Для оптимизации был предложен новый алгоритм управления энергией, который

определяет поток энергии, производимой фотоэлектрическими модулями, в батарее. Этот алгоритм выявляет наилучшую комбинацию элементов батареи на основе прогнозируемой мощности фотоэлектрических модулей, чтобы обеспечить максимальное использование энергии, производимой PV модулями, в любой произвольный период времени. Предложенная стратегия обеспечивает эффективную зарядку батарей с оптимальным использованием энергии фотоэлектрических модулей при различных погодных условиях.

Дальнейшая структура статьи представлена следующим образом: в разделе 2 подробно описывается методология модели прогнозирования PV мощности, включая математический анализ SVR и показатели оценки производительности. В этом разделе также описывается предлагаемая система зарядки аккумуляторов на основе фотоэлектрических систем, включая трехступенчатую стратегию зарядки CC/CV и алгоритм для максимизации использования энергии, вырабатываемой фотоэлектрическими системами. В разделе 3 представлены результаты и обсуждаются различные случаи. Наконец, в разделе 4 подводятся итоги и определяются направления для будущих исследований.

1. Методология

В этом разделе представлено подробное описание методов, используемых в данном исследовании, включая прогнозирование и управление зарядкой. На рис. 1 изображена концептуальная методология данного исследования, включающая все необходимые блоки для оптимизации производства солнечной энергии с использованием управления зарядкой на основе прогнозирования.

1.1. Прогнозирование выходной PV мощности

PV мощность зависит от различных метеорологических факторов, включая солнечную радиацию, температуру, давление ветра и влажность. Эта изменчивость создает сложности для их эффективного использования, особенно в автономных аккумуляторных системах на основе фотоэлектрических элементов. Точное прогнозирование PV мощности снижает неопределенность, повышает надежность, поддерживает качество электроэнергии и способствует интеграции фотоэлектрических систем [43]. Для повышения точности прогнозирования производства электроэнергии фотоэлектрическими системами была разработана модель SVR, использующая исторические данные реальной фотоэлектрической системы. В этом исследовании были собраны исторические данные о производстве фотоэлектрической энергии и соответствующие метеорологические данные реальной фотоэлектрической системы в период с 1 января 2017 года по 31 декабря 2017 года с пятиминутными интервалами.

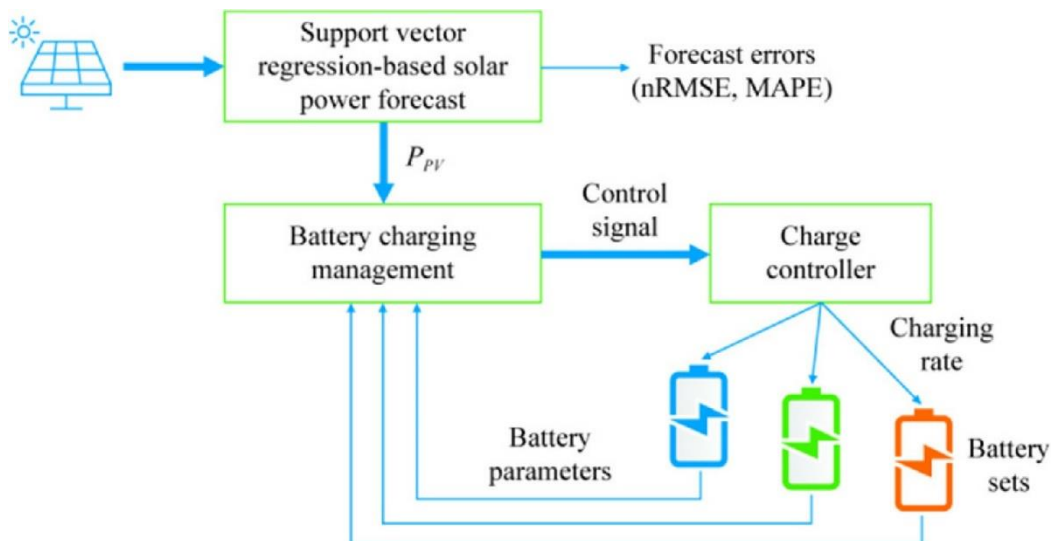


Рис. 1. Концептуальный обзор стратегии управления зарядкой на основе прогнозирования.

1.1.1. Регрессия опорных векторов

Регрессия поддержки (SVR) — широко используемый метод машинного обучения с учителем для анализа и прогнозирования временных рядов. SVR превосходит по точности обучения и прогнозирования даже при ограниченном объеме обучающих данных [44]. SVR использует нелинейное отображение для преобразования входных данных в многомерное пространство признаков, где выполняется линейная регрессия. Предполагается, что обучающие наборы данных $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)\}$ where $x_i \in R^n$ являются входным вектором, а $y_i \in R^1$ — эквивалентным выходным значением. Функция аппроксимации $f(x)$ представлена в уравнении (1):

$$y' = f(x) = w \times \psi(x) + b \quad (1)$$

где $w \in R^n$ и $b \in R$ — соответственно вектор весов и составляющая смещения. В SVR задача регрессии переформулируется как задача оптимизации, как показано в уравнении (2).

$$\begin{aligned} \min : & \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^m (\xi_i + \xi_i^*) \\ \text{Subject to : } & y_i - f(x) \leq \varepsilon + \xi_i^*; \\ & f(x) - y_i \leq \varepsilon + \xi_i; \quad \xi_i^*, \xi_i \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

где ε — радиус ε -нечувствительной трубки, определяющий допустимый запас. SVR также использовался для подгонки обучающих данных. Штрафной коэффициент C контролирует компромисс между эмпирическим риском и плоскостью модели. И ε , и C являются параметрами, определяемыми пользователем. Точность прогнозирования модели на основе SVR в значительной степени зависит от правильного выбора ее параметров. Эта задача оптимизации с ограничениями была решена с использованием метода множителей Лагранжа. Согласно этому методу, функция Лагранжа может быть описана уравнением (3).

$$\begin{aligned} L(w, b, \xi, \xi^*, \alpha, \alpha^*, \gamma, \gamma^*) = & \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^m (\xi_i + \xi_i^*) - \sum_{i=1}^m \alpha_i |\xi_i| \\ & + \varepsilon - y_i + f(x_i) - \sum_{i=1}^m \alpha_i^* |\xi_i^*| + \varepsilon \\ & + y_i - f(x_i) - \sum_{i=1}^m (\xi_i \gamma_i + \xi_i^* \gamma_i^*) \end{aligned} \quad (3)$$

где ξ и ξ^* — две свободные переменные, представляющие собой разницу между фактическим значением и соответствующим граничным значением ε -нечувствительной трубки в верхней и нижней части трубки соответственно. Следовательно, $\alpha, \alpha^* \geq 0$. Для вычисления седловой точки L можно использовать уравнение (4).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial w}(L) = 0 & \Rightarrow w = \sum_{i=1}^m (\alpha_i - \alpha_i^*) \Psi(x_i), \\ \frac{\partial}{\partial b}(L) = 0 & \Rightarrow \sum_{i=1}^m (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial \xi_i}(L) & \Rightarrow C - \alpha_i - \gamma_i = 0, \\ \frac{\partial}{\partial \xi_i^*}(L) & \Rightarrow C - \alpha_i^* - \gamma_i^* = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя уравнение (4) в исходную функцию (3), получаем модель в уравнении (5):

$$\begin{aligned}
\max : & \bar{w}(\alpha, \alpha^*)_{w,b,\xi,\xi^*} - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^m (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) < \psi(x_i), \psi(x_j) > \\
& - \sum_{i=1}^m (\alpha_i + \alpha_i^*) \varepsilon + \sum_{i=1}^m (\alpha_i - \alpha_i^*) y_i \\
\text{Subject to : } & \sum_{i=1}^m (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0; \\
& 0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq C
\end{aligned} \tag{5}$$

Введем функцию ядра $k(x_i, x_j)$ вместо вещественной функции $\psi(x_i) \psi(x_j)$, тогда модель можно получить в виде уравнения (6).

$$\begin{aligned}
\max : & \bar{w}(\alpha, \alpha^*)_{w,b,\xi,\xi^*} = -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^m (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) k(x_i, x_j) \\
& - \sum_{i=1}^m (\alpha_i + \alpha_i^*) \varepsilon + \sum_{i=1}^m (\alpha_i - \alpha_i^*) y_i \\
\text{Subject to : } & \sum_{i=1}^m (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0; \\
& 0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq C
\end{aligned} \tag{6}$$

Правильный выбор функции ядра и ее параметров имеет решающее значение для разработки модели SVR. Среди различных функций ядра широко используется гауссова радиальная базисная функция (Гауссова RBF) благодаря ее высокой универсальной способности оценки в пространстве признаков. Следовательно, в данном исследовании для разработки модели прогнозирования на основе SVR используется ядро Гауссова RBF. Математическое уравнение для ядра Гауссова RBF представлено в уравнении (7).

$$k(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right) = \exp\left(-\gamma\|x_i - x_j\|^2\right), \quad \gamma > 0 \tag{7}$$

где σ^2 — ширина полосы пропускания функции ядра RBF.

Решив задачу оптимизации, можно получить оптимальные значения для α_i и α_i^* , что приведет к наилучшей аппроксимирующей функции регрессии, которая описана в уравнении (8).

$$f(x) = \sum_{i=1}^m (\alpha_i - \alpha_i^*) \times k(x_i, x_j) + b \tag{8}$$

где α_i и α_i^* — множители Лагранжа. Нелинейные случаи можно преобразовать в линейные, отобразив исходные переменные в многомерное пространство признаков с помощью ядра $k(x_i, x_j)$.

1.1.2. Обработка данных

В SVR входные данные нелинейно отображаются в многомерное пространство перед применением линейной регрессии. Однако, если диапазон данных чрезмерно велик, это может привести к неточной подгонке и снижению точности регрессии. Поскольку диапазоны выходной PV мощности и солнечной радиации довольно велики, необходима предварительная обработка для масштабирования данных до меньшего диапазона перед вводом модели. Нормализация — эффективный метод масштабирования данных до нуля или единицы. Процесс нормализации описывается следующей формулой в уравнении (9) [2]:

$$d_{\text{Norm}} = \frac{d_{\text{actual}} - d_{\text{min}}}{d_{\text{max}} - d_{\text{min}}} \tag{9}$$

где d_{Norm} — нормализованные входные данные; d_{actual} — исходные входные данные; d_{max} и d_{min} — максимальное и минимальное значения исходных входных данных соответственно. Весь вектор

данных, такой как PV мощность и все метеорологические векторы, должны быть нормализованы отдельно.

1.1.3. Модель на основе SVR для прогнозирования производства PV электроэнергии

Благодаря своей способности эффективно обрабатывать нелинейные зависимости между входными и выходными данными, SVR широко используется для точного прогнозирования производства PV электроэнергии. Модель использует ядерную функцию, такую как радиальная базисная функция (RBF), для повышения своей способности обрабатывать сложные шаблоны данных. Ее устойчивость к переобучению и способность хорошо обобщать данные при ограниченном объеме обучающей выборки обеспечивают надежные прогнозы при различных погодных условиях. В то время как в предыдущем исследовании [45] рекомендовалась модель прогнозирования производства PV электроэнергии на сутки вперед с почасовым интервалом, в данном исследовании была разработана модель прогнозирования на сутки вперед с пятиминутным шагом. Для обучения и тестирования подхода SVR с пятиминутным шагом использовались усредненные за пять минут выборки данных. Блок-схема модели прогнозирования на основе SVR показана на рис. 2.

Модель прогнозирования выходной PV мощности на основе SVR собирала пятиминутные усредненные исторические данные о мощности и соответствующих метеорологических параметрах (т. е. солнечной радиации, температуре атмосферы и давлении ветра) от экспериментальной фотоэлектрической системы с помощью автоматизированной системы сбора данных. Эти метеорологические параметры и выходная PV мощность служили, соответственно, входными и выходными наборами данных для обучения модели. Первоначально для обучения и тестирования был выбран подходящий набор исторических данных. Весь набор данных был нормализован для минимизации ошибки регрессии при сохранении сопоставления данных. Примерно 80 % данных было использовано для обучения, а оставшиеся данные — для тестирования. Модель была разработана путем настройки трех ключевых параметров SVR (C , ϵ и γ) с помощью метода поиска по сетке. Это систематический подход к настройке гиперпараметров путем исчерпывающего поиска наилучших комбинаций при минимизации ошибки прогнозирования и среднеквадратичной ошибки (MSE). Хотя этот метод может быть вычислительно затратным для больших наборов данных, он подходит для ситуаций, когда точность имеет решающее значение. В данном исследовании вычислительная нагрузка минимизируется за счет сокращения пространства поиска на основе предварительных знаний, полученных в предыдущих исследованиях. Модель была оптимизирована на основе выбранных параметров. Для прогнозирования выработки PV электроэнергии в модель были введены пятиминутные усредненные нормализованные метеорологические данные за день, полученные из ближайшего метеорологического центра. Поскольку модель обрабатывает нормализованные данные, выходные данные должны быть антинормализованы для восстановления исходных значений выходной PV мощности и проведения анализа производительности.

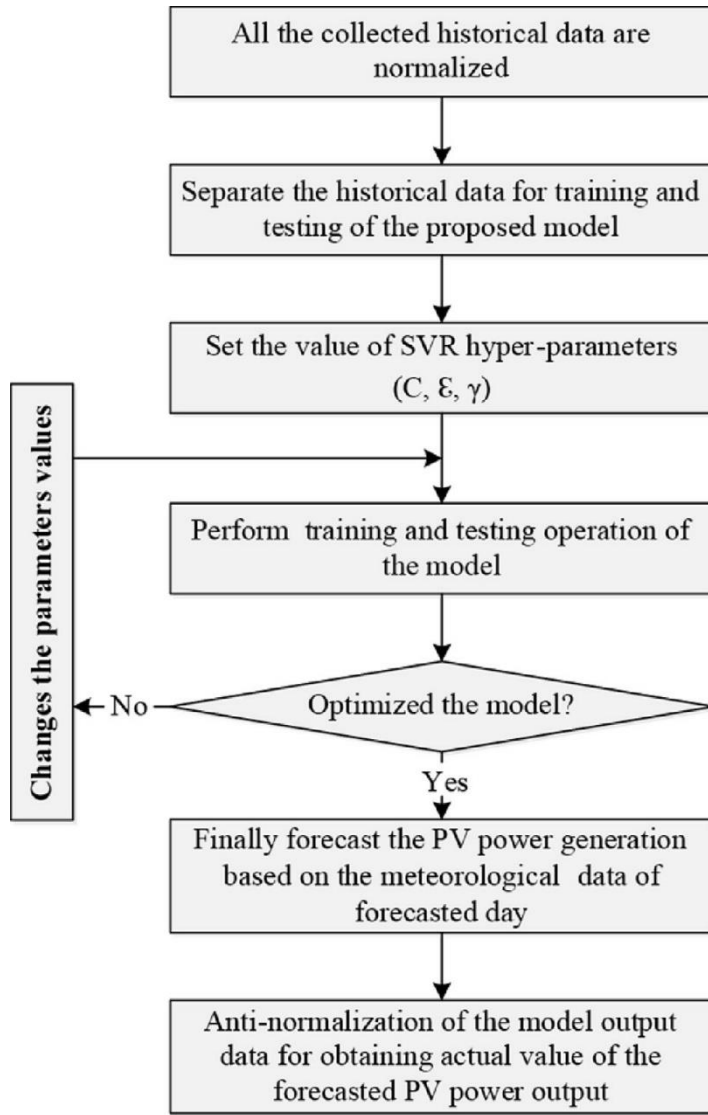


Рис. 2. Блок-схема модели прогнозирования производства PV электроэнергии на основе SVR.

1.1.4. Показатели оценки эффективности модели прогнозирования

Для моделей прогнозирования доступно множество метрик оценки эффективности. В данном исследовании двумя стандартными и широко используемыми метриками являются нормированная среднеквадратная ошибка (nRMSE) и средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE). Эти метрики используются для оценки точности модели прогнозирования. Математические выражения для этих метрик приведены в уравнениях (10) и (11).

$$nRMSE\% = \left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{\text{forecasted}} - P_{\text{actual}})^2} \right) \times \frac{100}{P_{\text{actual(max)}}} \quad (10)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|P_{\text{forecasted}} - P_{\text{actual}}|}{P_{\text{actual}}} \times 100\% \quad (11)$$

где P_{actual} и $P_{\text{forecasted}}$ — измеренные и прогнозируемые значения произведённой PV энергией мощности соответственно для каждого периода. $P_{\text{actual max}}$ — максимальное значение оцененной произведённой PV энергией мощности, а N — общее количество выборок.

Благодаря своим внутренним химическим свойствам, регуляторы заряда CC/CV идеально подходят для зарядки литий-ионных батарей. Трехступенчатый регулятор CC/CV задает два уровня

постоянного тока, за которыми следует постоянное напряжение, подаваемое на элемент батареи в зависимости от уровня заряда (SOC). На рис. 3 показана блок-схема предлагаемой трехступенчатой стратегии зарядки CC/CV.

В режиме зарядки с постоянным напряжением (CV) батарея заряжается при фиксированном напряжении, а ток постепенно уменьшается по мере достижения батареей максимального заряда. В режиме зарядки постоянным током (CC) батарея заряжается постоянным током до достижения определенного порогового напряжения. Технология CC обеспечивает контролируемую скорость зарядки батареи, предотвращая перегрев и повреждение. Контроллер заряда CC/CV отслеживает уровень заряда батареи и регулирует заряд до постоянного тока или напряжения в зависимости от наблюдаемого уровня заряда. Однако, если батарея сильно разряжена или повреждена, литий-ионные элементы могут не принимать стандартный процесс зарядки постоянным/постоянным напряжением (CC/CV). В таких случаях батарея предварительно заряжается умеренным током до тех пор, пока не будет готова к обычной зарядке CC/CV. Как правило, этот небольшой ток составляет около 30 % от обычного тока и называется «подзарядкой малым током», обычно применяемой для поддержания уровня заряда без перезарядки. Если элементы батареи не достигают заданного минимального уровня напряжения после подзарядки малым током в течение отведенного времени, элемент считается поврежденным, и зарядка прекращается до замены поврежденного элемента. На рис. 4 показан типичный трехступенчатый профиль зарядки CC/CV для литий-ионного элемента батареи, демонстрирующий зарядку постоянным током (CC), зарядку постоянным напряжением (CV) и подзарядку малым током.

Подается малый ток ($I_{trickle}$) до тех пор, пока напряжение батареи не достигнет указанного порогового напряжения, указывающего на желаемый уровень заряда (SOC). После достижения этого порога батарея заряжается постоянным током (I_{cc}) до достижения желаемого уровня заряда. Затем используется зарядка постоянным напряжением до достижения максимального уровня заряда, после чего процесс зарядки завершается, и ток становится очень низким (близким к нулю). Аккумулятор отключается, чтобы предотвратить перезарядку. Предложенная технология зарядки также контролирует температуру аккумулятора в различных точках на протяжении всего процесса зарядки. Зарядка прекращается, когда температура превышает допустимый предел.

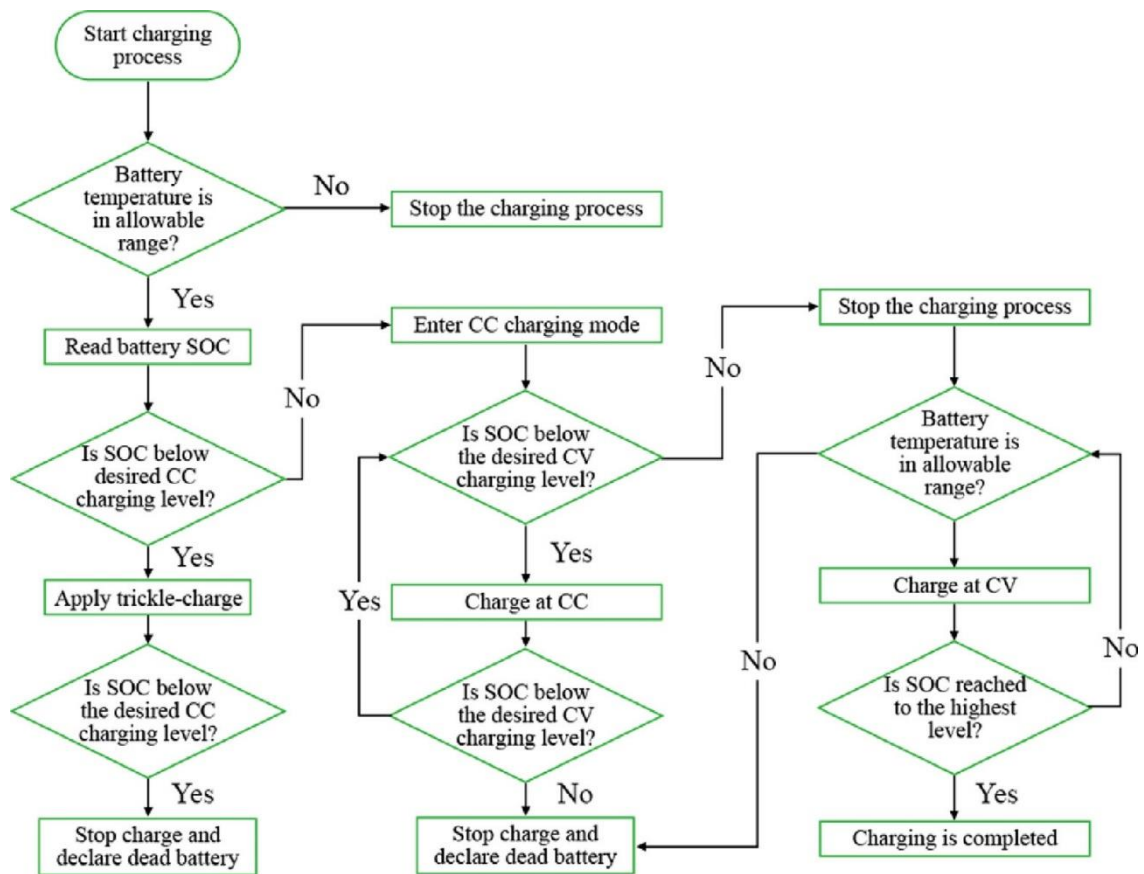


Рис. 3. Блок-схема трех этапов стратегии зарядки CC/CV.

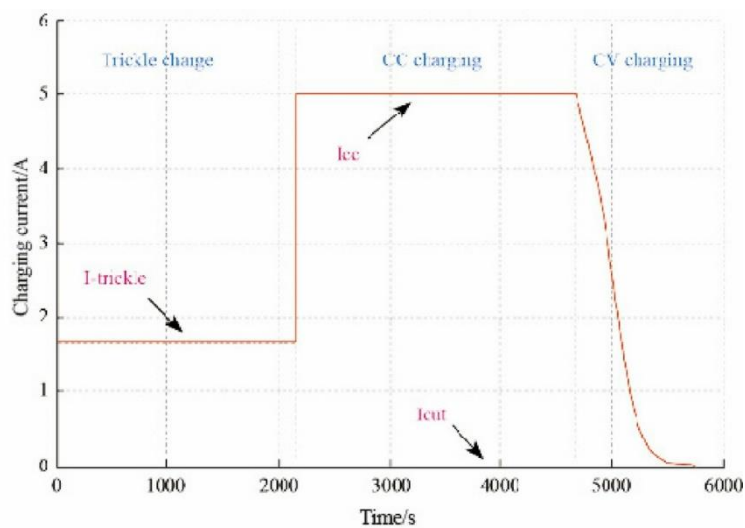


Рис. 4. Стандартное сечение зарядного тока трехступенчатого регулятора заряда CC/CV.

1.2. Предлагаемая система управления зарядкой аккумулятора

Централизованная стратегия управления зарядкой использует единый регулятор заряда для управления зарядкой батареи или аккумуляторной батареи в целом. Если требуемая мощность зарядки превышает мощность, вырабатываемую фотоэлектрическими панелями, поддержание CC/CV скорости зарядки становится сложной задачей, что снижает производительность и срок службы батареи. И наоборот, если требуемая мощность зарядки ниже мощности, вырабатываемой фотоэлектрическими панелями, избыточная мощность теряется, что может быть значительным в больших системах.

Мощность фотоэлектрических панелей и скорость зарядки постоянно изменяются из-за меняющихся погодных условий и уровня заряда батареи соответственно. Хотя MPPT оптимизирует производство PV энергии, он не гарантирует оптимального использования и требует дополнительных стратегий хранения и управления. Для решения этих задач рекомендуется новая стратегия управления батареями (BCM) для автономных PV систем, позволяющая минимизировать потери PV мощности, поддерживать надлежащую скорость зарядки и повышать производительность и срок службы батареи. Блок-схема предполагаемой системы BCM представлена на рис. 5 и включает в себя фотоэлектрический модуль мощностью 20 Вт. При точном согласовании нагрузки преобразователь постоянного тока с MPPT обеспечивает максимальную мощность при практически постоянном напряжении. Поскольку измерение и согласование нагрузки для достижения максимальной мощности, вырабатываемой фотоэлектрической системой, представляет собой сложную задачу, прогнозируемая PV мощность используется в качестве оценки.

Реализована децентрализованная стратегия зарядки, в которой каждая литий-ионная батарея управляется собственным регулятором заряда CC/CV для обеспечения надлежащей зарядки. Требуемая мощность зарядки всех батарей в любой момент времени должна быть равна или превышать прогнозируемую максимальную PV мощность. Вместо непрерывной зарядки всех батарей была выбрана подходящая комбинация батарей для зарядки. Эта комбинация гарантировала, что суммарная необходимая мощность зарядки будет приблизительно равна или немного меньше прогнозируемой PV мощности.

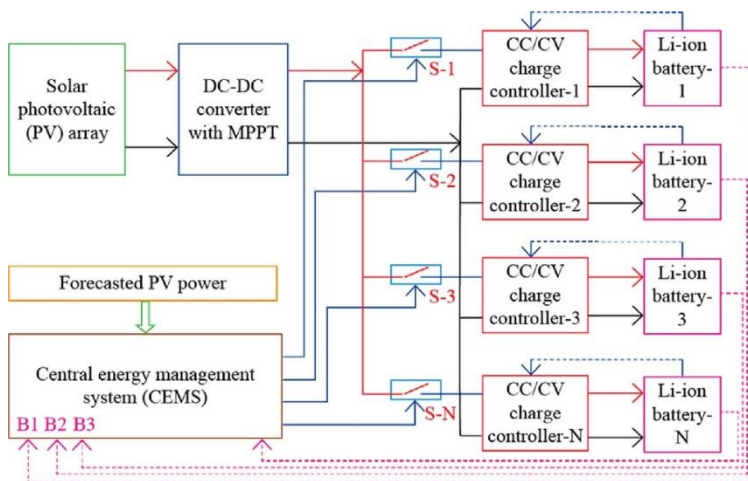


Рис. 5. Блок-схема системы BCM.

Предложенная стратегия использует прогнозируемую на сутки выходную PV мощность с пятиминутным шагом. Мощность зарядки литий-ионного аккумулятора в процессе зарядки оценивалась путем умножения приложенного зарядного тока на профиль напряжения аккумулятора. На рис. 6 показан расчетный профиль мощности зарядки для литий-ионных аккумуляторных элементов 3,7 В, 0,5С различной емкости в зависимости от уровня заряда (SOC), а подробные характеристики приведены в таблице 1.

Централизованная система управления энергопотреблением (CEMS) интегрирована в рекомендуемую стратегию зарядки для контроля всей системы зарядки и обеспечения эффективного управления энергией. Сначала CEMS получает прогнозируемую PV мощность, с разрешением в пять минут. В начале процесса зарядки CEMS получает информацию о емкости и начальном состоянии заряда (SOC) каждой батареи. Затем система определяет потребности в энергии для каждой батареи на следующие пятиминутные интервалы на основе ее емкости и начального состояния заряда. Наконец, CEMS управляет батареями в процессе зарядки каждые пять минут в соответствии с прогнозируемой PV мощностью и предложенным алгоритмом.

В данном исследовании предложен новый алгоритм для CEMS, позволяющий эффективно выполнять желаемые операции. Концептуальная схема разработанного алгоритма для CEMS показана на рис. 7. После определения необходимой мощности зарядки для каждой ячейки на предстоящие пятиминутные интервалы система поддерживает таблицу всех возможных комбинаций батарей. Математическая формула для расчета количества возможных комбинаций батарей приведена в уравнении (12).

$$\text{Number of possible combinations} = \sum_{r=1}^m n_{C_r} \quad (12)$$

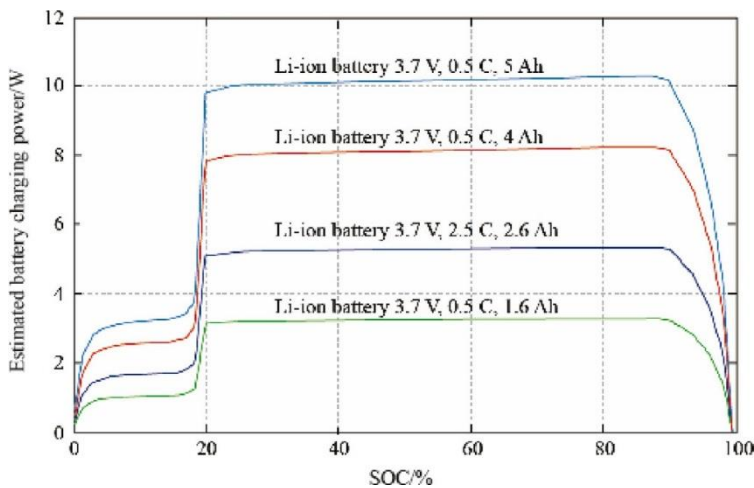


Рис. 6. Расчетная мощность, необходимая для работы литий-ионных аккумуляторных элементов.

Таблица 1. Параметры накопления энергии.

Parameter	Specification
Type	Li-ion
Nominal voltage	3.7 V
Fully charged voltage	4.2 V
Cutoff voltage	2.5 V–3.0 V
Capacity	500 mAh to 5000 mAh
Charge current	Standard: 0.5C; Fast: Up to 1C
Max discharge current	Continuous: 1C–3C; Peak: Up to 10C
Energy density	200–265 Wh/kg; 500–700 Wh/L
Cycle life	~300–1000 cycles
Operating temperature	Charge: 0 °C to 45 °C; Discharge: –20 °C to 60 °C

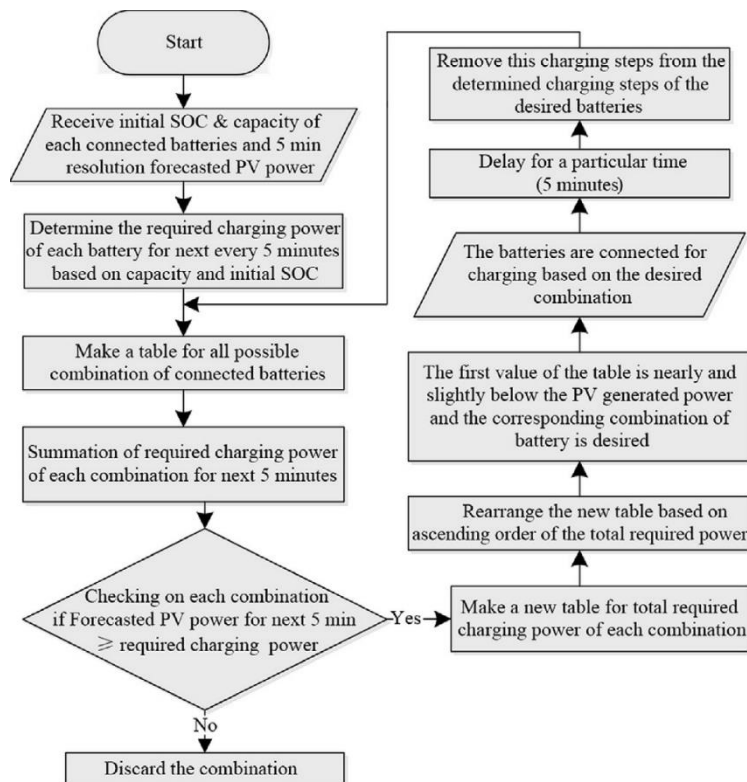


Рис. 7. Предлагаемая блок-схема централизованной системы управления энергопотреблением.

где n — количество батарей, рассматриваемых в системе зарядки, а $m = 1, 2, 3, n$; система CEMS рассчитывает общую необходимую мощность зарядки для каждой комбинации батарей в течение пятиминутного интервала. Затем эта сумма сравнивается с прогнозируемой PV мощностью за тот же период. Система определяет оптимальную комбинацию батарей, в которой сумма необходимых мощностей зарядки приблизительно, но незначительно, ниже прогнозируемой PV мощности. Затем выбранные батареи с наилучшим сочетанием параметров были подключены к источнику питания (преобразователю постоянного тока) на пятиминутный интервал. Этот процесс повторялся с интервалами в течение всего светового дня.

2. Обсуждение результатов

2.1. Прогнозирование выходной PV мощности

В данной модели прогнозирования используется поликристаллическая фотоэлектрическая система мощностью 20 Вт. Поскольку время восхода и захода солнца в регионе составляет приблизительно 7:00 и 19:00 соответственно, ожидается, что фотоэлектрическая энергия будет производится только в эти часы. Поэтому для снижения вычислительных затрат и повышения точности обучения модели использовались только экспериментальные исторические данные за дневное время. Для прогнозирования производства PV электроэнергии в данном исследовании были выбраны 24 сентября (ясный день) и 29 сентября (облачный/дождливый день) 2017 года.

На рис. 8 показаны определенные и прогнозируемые значения выходной PV мощности, полученные с помощью разработанной модели, в ясный (солнечный) день. Это показывает, что прогнозируемые значения точно соответствуют фактическим измеренным значениям. На рис. 9 представлено аналогичное сравнение для дождливого или облачного дня, где прогнозируемая PV мощность хорошо согласуется с фактическими измерениями, за исключением нескольких точек в начале дня. Однако, поскольку выходная PV мощность в этих точках очень низкая, влияние на общую эффективность модели прогнозирования минимально.

На рис. 10 показано точечное отклонение между измеренной и прогнозируемой выходной PV мощностью. Отклонения находились в допустимом диапазоне, за исключением начала и конца дня, когда выходная PV мощность была очень низкой. Ошибка прогнозирования разработанной модели оценивалась с использованием различных метрик, а результаты для ясного неба и облачных/дождливых дней суммированы в таблице 2.

В таблице 2 модель демонстрирует явное различие в производительности в зависимости от типа погоды. В дни с ясным небом средняя абсолютная ошибка прогнозирования (MAPE) была относительно низкой (12,48 %), что указывает на хорошую работу модели в условиях стабильных и предсказуемых условий. В облачные или дождливые дни MAPE увеличилась до 16,05 %, что ожидаемо из-за быстрых изменений в производстве солнечной энергии в таких условиях. Также очевидно, что модель сохраняет практически одинаковый уровень точности при различных погодных условиях. Эти ошибки прогнозирования могут нарушить графики зарядки аккумуляторов и максимальное использование мощности, что может привести к ухудшению состояний аккумуляторов. Хотя средняя MAPE в 14,265 % обычно считается приемлемой для систем возобновляемой энергии, более критичные ошибки в условиях облачности требуют мониторинга в реальном времени, адаптивных алгоритмов зарядки и запасов прочности в стратегии зарядки. В следующем разделе представлена стратегия зарядки, использующая технологию управления зарядкой аккумуляторов (BCM) для максимального использования PV мощности.

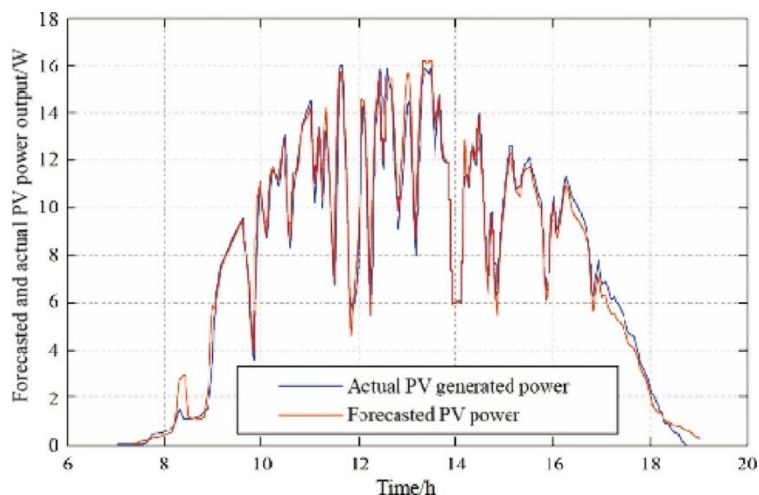


Рис. 8. Фактическая и прогнозируемая выходная PV мощность в ясный день.

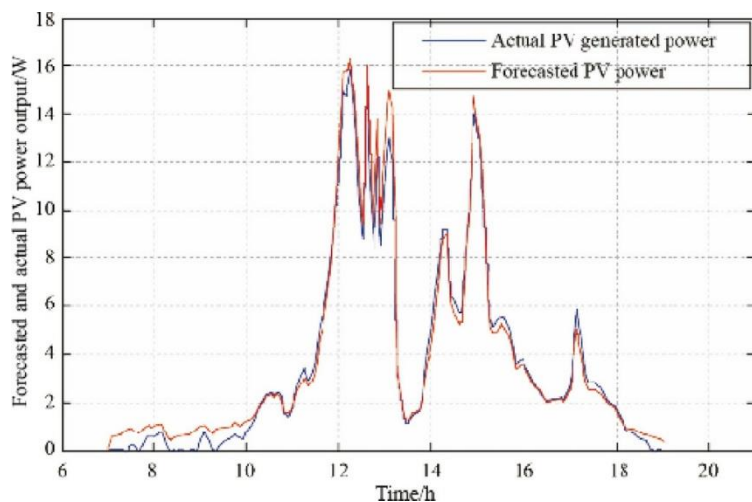


Рис.9. Фактическая и прогнозируемая PV мощность в дождливый или пасмурный день.

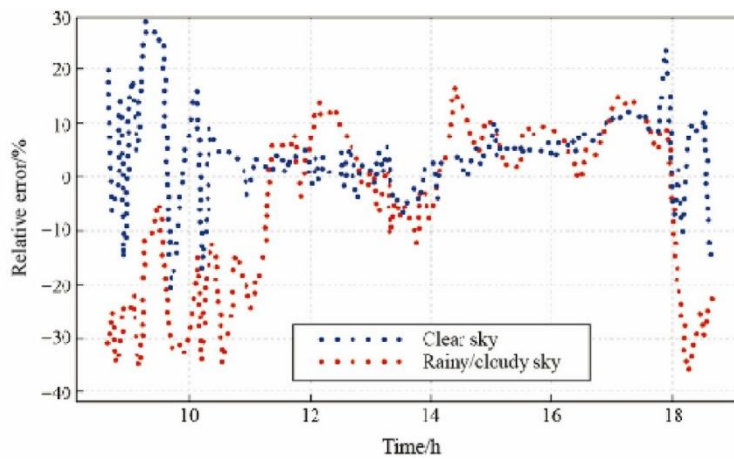


Рис. 10. Относительные погрешности фактической и прогнозируемой PV мощности в разные дни.

2.2. Трехступенчатый регулятор CC/CV заряда

Поддержание надлежащей скорости зарядки для автономного аккумулятора на основе PV энергии затруднено из-за прерывистости производства PV электроэнергии. В данной статье представлен трехступенчатый регулятор CC/CV заряда для зарядки литий-ионных аккумуляторных элементов. Технические характеристики литий-ионной батареи приведены в таблице 1. Концепция проектирования этого регулятора заряда была описана ранее. Предложенный регулятор, который подает постоянный ток или напряжение на аккумуляторные элементы по мере необходимости, был реализован в MATLAB/Simulink. Управляющий сигнал генерировался на основе уровня заряда батареи (SOC), обеспечивая надлежащее применение CC/CV зарядки. На рис. 11 показаны схемы зарядки аккумуляторной батареи при различных уровнях SOC, полученные с помощью данного регулятора. Результаты моделирования показывают, что трехступенчатый регулятор CC/CV заряда эффективно заряжает литий-ионные аккумуляторные элементы. Уровни напряжения литий-ионных аккумуляторных элементов при различных уровнях SOC в течение периода зарядки показаны на рис. 12. Начальные значения SOC варьируются от 5% до 60% и не предназначены для представления стандартных условий эксплуатации, а скорее для более широкого влияния на производительность модели. Включение чрезвычайно низких значений в 5% обеспечило всестороннюю оценку модели в широком диапазоне уровней SOC.

Таблица 2. Погрешности различных показателей разработанной модели прогнозирования производства PV электроэнергии.

Metric	Day type	Error	Average
nRMSE (%)	Clear sky	3.22	3.385
	Cloudy/rainy	3.55	
MAPE (%)	Clear sky	12.48	14.265
	Cloudy/rainy	16.05	

2.3. Использование PV энергии для зарядки аккумуляторов

Обеспечение максимального использования PV энергии имеет решающее значение в автономной системе зарядки PV аккумуляторов. Хотя напряжение, подаваемое на фотоэлектрическую систему, оставалось практически постоянным, ток изменялся со временем и в зависимости от погодных условий. Неструктурированная фотоэлектрическая система может препятствовать процессу зарядки из-за недостаточной мощности или избытка PV энергии, которая теряется, когда превышает потребности в зарядке аккумулятора. Для решения этой задачи необходимо сбалансировать мощность зарядки аккумулятора с PV мощностью. В данном исследовании

предлагается новая стратегия управления зарядкой аккумулятора (BCM) для оптимизации PV мощности при сохранении соответствующей скорости зарядки.

В предыдущих разделах подробно описывался предлагаемый алгоритм CEMS и конструкция системы. Разработанная стратегия зарядки, включая CEMS, была реализована с использованием MATLAB/Simulink. В этой конфигурации к системе зарядки были подключены восемь литий-ионных элементов с различной емкостью и уровнем заряда (SOC). Эти элементы были выбраны на основе общей необходимой мощности зарядки восьми элементов и прогнозируемой PV мощности в течение дня. Для оптимальной работы требуемая мощность зарядки должна быть немного выше прогнозируемой PV мощности. Поскольку PV мощность значительно ниже в пасмурные или дождливые дни, чем в ясные, можно соединить разные ячейки, чтобы обеспечить их полную зарядку. Емкость и начальный уровень заряда (SOC) подключенных ячеек в ясные и пасмурные/дождливые дни, использованные для тестирования предлагаемой системы, приведены в таблице 3.

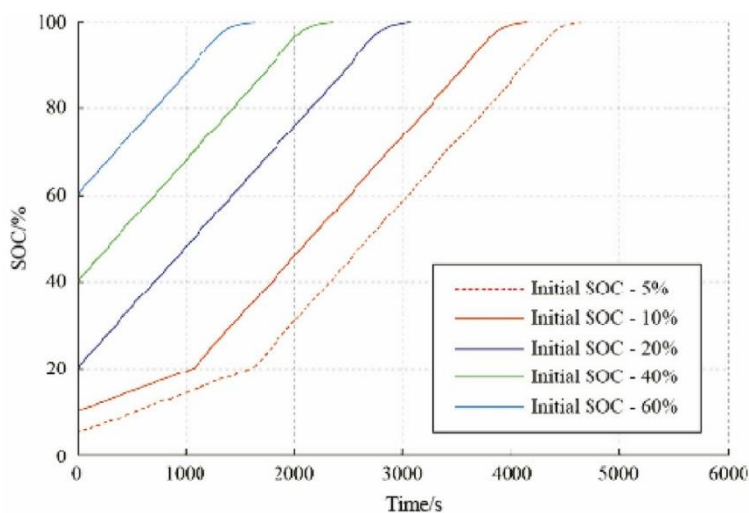


Рис. 11. Схема заряда литий-ионного аккумулятора при различных значениях SOC.

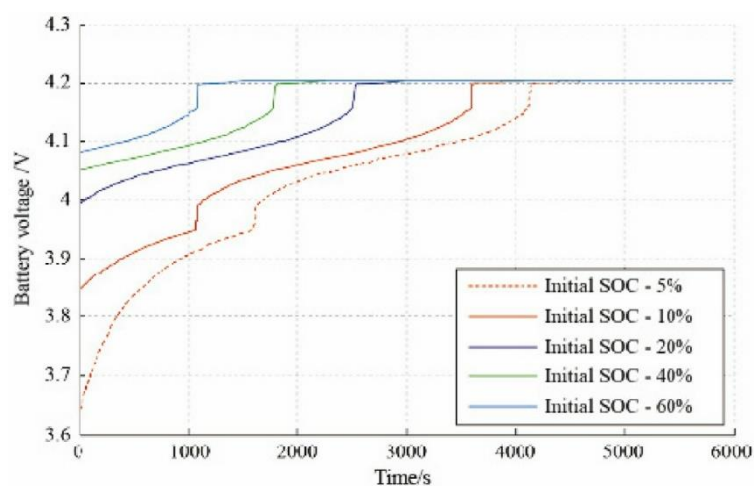


Рис. 12. Схема напряжения литий-ионного аккумуляторного блока при различных значениях SOC.

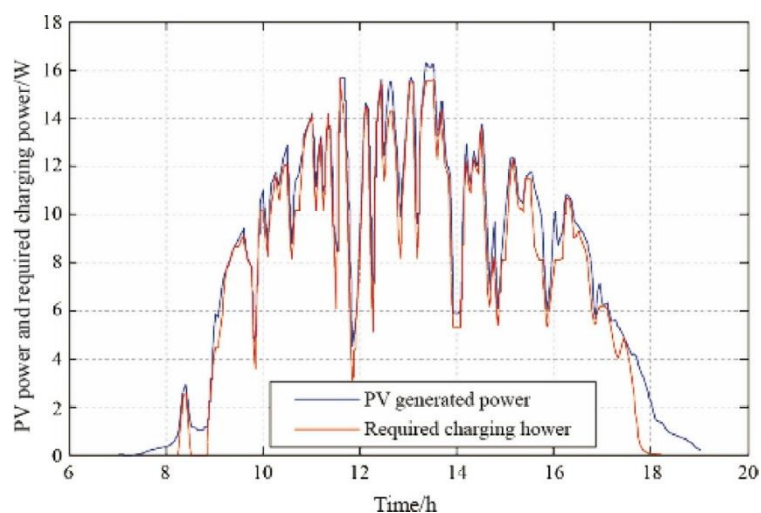


Рис. 13. PV мощность и заряд батареи в ясный день.

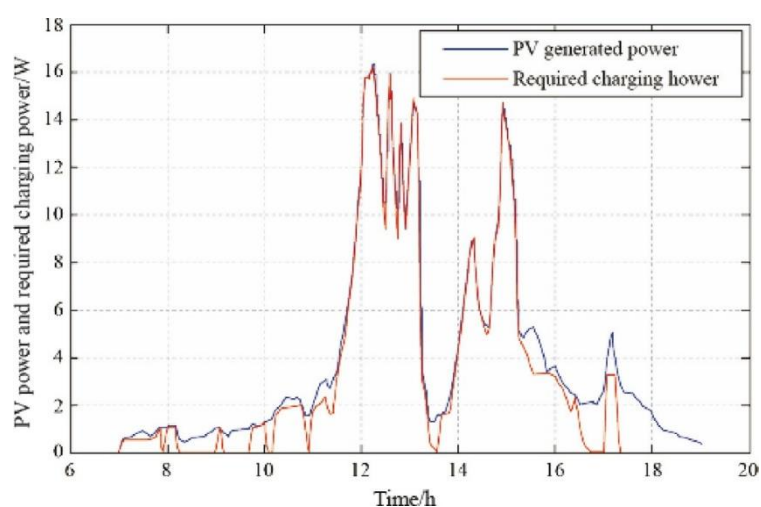


Рис. 14. PV мощность и заряд батареи в пасмурные/дождливые дни.

На рис. 13 показана PV мощность и мощность, необходимая для зарядки аккумулятора в ясный день. Это показывает, что ожидаемая мощность для зарядки аккумулятора точно соответствует PV мощности с небольшими расхождениями в конце среднестатистического дня. На рис. 14 показана PV мощность и мощность аккумулятора в облачный или дождливый день. Необходимая схема мощности зарядки хорошо совпадал с PV мощностью, за исключением нескольких точек в начале и конце дня. В эти периоды PV мощность была очень низкой, что делало ее недостаточной для зарядки батарей при поддержании необходимой скорости зарядки. Процентное соотношение PV мощности, используемой для зарядки батарей при различных погодных условиях, суммировано в таблице 4.

Таблица 3. Элементы аккумулятора, рассматриваемые для зарядки в разные погодные дни.

Day type Cell. no.	Clear-sky day		Cloudy or rainy day	
	Cell capacity (Ah)	Initial SOC	Cell capacity (Ah)	Initial SOC
1.	5	40 %	3	25 %
2.	4	60 %	3	5 %
3.	4	20 %	2	40 %
4.	4	5 %	2	20 %
5.	3	25 %	1.6	20 %
6.	3	20 %	1.6	5 %
7.	3	5 %	0.8	20 %
8.	2.6	5 %	0.8	5 %

Таблица 4. Процент использованной PV мощности на зарядку аккумуляторов.

Parameter	Sunny day	Cloudy/rainy day	Average	Previous work
Percentage of utilization	91.39 %	83.55 %	87.47 %	82.41 % [46], 84.1 % [47]

В данном исследовании коэффициент использования фотоэлектрической энергии рассчитывается как доля солнечной энергии, вырабатываемой фотоэлектрической системой и используемой для зарядки батареи, по сравнению с общей доступной фотоэлектрической энергией за данный период с использованием уравнения (13).

$$U_R = \frac{\text{Energy used} * 100}{\text{Total PV energy available}} \quad (13)$$

Исследование показало среднюю ошибку прогнозирования в 3,385% для nRMSE и 14,265% для MAPE, что свидетельствует о высоком уровне точности прогнозирования. Однако влияние ошибки прогнозирования на предлагаемую систему управления аккумуляторами и ее общую производительность можно рассмотреть в нескольких ключевых областях, таких как скорость зарядки аккумулятора, срок службы и коэффициенты использования. В данном исследовании предлагается адаптивная стратегия зарядки для решения задачи этих ошибок прогнозирования. Предложенная стратегия управления зарядкой достаточно надежна, чтобы справляться с ошибками прогнозирования и при этом обеспечивать высокую степень использования. Система достигла среднего коэффициента использования 87,47 %, при этом коэффициент использования составил 91,39 % в солнечные дни и 83,55 % в пасмурные и дождливые дни, что свидетельствует о ее гибкости в отношении колебаний солнечной радиации. Кроме того, схема управления зарядкой демонстрирует улучшенный коэффициент использования для автономных аккумуляторных PV систем [46,47].

3. Заключение

В данном исследовании предлагается новая стратегия зарядки аккумуляторов для максимизации использования PV энергии при обеспечении оптимальной скорости зарядки. Разработанная автономная система зарядки PV аккумуляторов включает в себя трехступенчатый регулятор постоянного тока/постоянного напряжения для литий-ионных батарей и систему непрерывной зарядки/разрядки (CEMS). Результаты показали, что регулятор заряда эффективно управляет элементами литий-ионных батарей, поддерживая надлежащую скорость зарядки. Алгоритм, разработанный для системы непрерывного мониторинга энергопотребления (CEMS) на основе прогнозируемого производства солнечной энергии, обеспечивает максимальное использование энергии солнечных батарей для зарядки аккумуляторов. Модель прогнозирования на сутки вперед на основе SVR точно предсказала производство солнечной энергии при различных погодных условиях со средней ошибкой прогноза 3,385 % по nRMSE и 14,265 % по MAPE.

Предложенная система зарядки аккумуляторов обеспечила общее использование 87,47 % производимой PV энергии, что значительно снизило потери энергии и затраты на зарядку в автономных фотоэлектрических системах. Ожидается, что эта система будет способствовать использованию автономных зарядных PV систем и поддержит расширение применения солнечной энергии.

В перспективе исследования планируется интеграция предлагаемой системы BSM с технологиями интеллектуальных энергосетей для повышения адаптивности и эффективности в режиме реального времени. Разработка передовых алгоритмов прогнозирования производства PV электроэнергии, таких как гибридные подходы машинного обучения, может повысить точность прогнозов производства PV электроэнергии при различных погодных условиях. Дополнительные решения для хранения энергии, такие как суперконденсаторы или альтернативные химические составы батарей, могут оптимизировать использование энергии и производительность системы. Наконец,

всесторонний анализ экономических и экологических преимуществ системы BSM может способствовать разработке политики и стимулировать внедрение фотоэлектрических систем.

О вкладе авторов в проект CRediT

Утпал Кумар Дас: написание текста — первоначальный вариант, проверка достоверности, программное обеспечение, методология, концептуализация. **Ашиш Кумар Кармакер:** написание текста — рецензирование и редактирование, визуализация.

О конфликте интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных конкурирующих финансовых интересов или личных связей, которые могли бы повлиять на результаты работы, представленной в данной статье.

Список используемой литературы

- [1] Н.А. Ибрагим, С.Р.В. Алви, З. Абд Манан и др., Влияние изменения климата на солнечную энергетику в Малайзии: технико-экономический анализ, *Renew.Sustain.Energy Rev.* 189 (2024) 113901.
- [2] У.К. Дас, К.С. Тей, М. Сейедмахмудиан и др., Прогнозирование выработки фотоэлектрической энергии и оптимизация модели: обзор, *Renew.Sustain.Energy Rev.* 81 (2018) 912-928.
- [3] Солнечные фотоэлектрические системы, Международное энергетическое агентство, 2024. Онлайн: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>. (Дата обращения: 10 января 2025 г.).
- [4] С. Какран, Дж. С. Раторе, А. Сидху и др., Достижения в области солнечной энергии и выбросы CO₂: сравнительный обзор пути ведущих стран к устойчивому будущему, *J.Clean.Prod.*(2024) 143598.
- [5] С. Дж. Альхарби, А. С. Алабуди, Обзор технико-экономического исследования по поддержке зданий с фотоэлектрическими системами, подключенными к сети, в соответствии с саудовскими правилами, *Energies* 16 (3) (2023) 1531.
- [6] П. Пандиян, Р. Ситхартхан, С. Сараванан и др., Комплексный обзор перспектив электрификации сельских районов с использованием автономных и гибридных энергетических технологий, *Sustainable Energy Technol.Assess.*52 (2022) 102155.
- [7] Т. Юварадж, К.Р. Девабаладжи, Дж.А. Кумар и др., Комплексный обзор и анализ размещения зарядных станций для электромобилей в распределительных сетях, *IEEE Access* 12 (2024) 5404-5461.
- [8] А.У. Рехман, З. Уллах, А. Шафик и др., Взаимосвязь управления нагрузкой, энергетической экономики и защиты окружающей среды с учетом зарядных станций для электромобилей на основе фотоэлектрических элементов, *Energy* 281 (2023) 128332.
- [9] А. Кейхани-Асл, Н. Перера, Дж. Лар и др., Применение пористых материалов и пенопласта в системах терморегулирования батарей: всесторонний обзор, посвященный их влиянию, численному моделированию и экспериментальной подготовке, *J.Storage Mater.*93 (2024) 112306.
- [10] Ю. Чжан, Р. Сюн, Х. Хе и др., Алгоритмы оценки состояния заряда и состояния энергии литий-ионных батарей с использованием проверки с аппаратным обеспечением в контуре управления, *IEEE Trans.Power Electron.*32 (6) (2016) 4421-4431.
- [11] Г.Дж. Чен, В.Х. Чанг, Оценка методов зарядки литий-ионных батарей, *Электроника* 12 (19) (2023) 4095.

- [12] Т. Сунь, С. Цзян, С. Ли и др., Новый подход к оценке емкости литий-ионных батарей, сочетающий трехпараметрическую модель снижения емкости с кривыми зарядки постоянным током, *IEEE Trans.Energy Convers.* 36 (3) (2021) 2574-2584.
- [13] С. Сепаси, К. Таличет, А.С. Праманик, Качество электроэнергии в микросетях: критический обзор основ, стандартов и тематических исследований, *IEEE Access* 11 (2023) 108493-108531.
- [14] А. Верма, Б. Сингх, AFF-SOGI-DRC управление интерактивной зарядной станцией для электромобилей на основе возобновляемой энергии с улучшением качества электроэнергии, *IEEE Trans.Ind.Appl.*57(1) (2020)588-597.
- [15] Х. Дай, Б. Цзян, С. Ху и др., Передовые стратегии управления батареями для устойчивого энергетического будущего: концепции многослойного проектирования и тенденции исследований, *Renew.Sustain.Energy Rev.*138(2021) 110480.
- [16] Ю.Хавайа, Н.Шанкар, И. Цицие и др., Решения для управления батареями литий-ионных аккумуляторов на основе искусственного интеллекта, *Ain Shams Eng.J.*14 (12) (2023) 102213.
- [17] А. Мофоласайо, Оценка и управление прямыми и косвенными выбросами от электромобилей и транспортных средств, работающих на ископаемом топливе, *Sustainability* 15 (2) (2023) 1138.
- [18] А.К. Кармакер, М.М. Рахман, М.А. Хоссейн и др., Исследование и корректирующие меры по сокращению выбросов парниковых газов от электростанций, работающих на ископаемом топливе, в Бангладеш, *J.Clean.Prod.*244 (2020) 118645.
- [19] Дж. Хоссейн, А.Ф. Кадир, Х. Шариф и др., Оптимальный гибрид, подключенный к сети Расчет размеров системы PV-BES для коммерческих зданий Малайзии, *Sustainability* 15 (13) (2023) 10564.
- [20] А.Гичи, А.Талья, Э.М.Беркук и др., Управление энергией и оценка производительности гибридной системы PV-BES, подключенной к сети, с внутренней схемой управления, *Sustain.Cities Soc.*41(2018)490-504.
- [21] Т.Поласек, М.Чадик, Прогнозирование производства электроэнергии фотоэлектрическими системами с использованием прогнозов погоды с высокой степенью неопределенности, *Appl.Energy* 339 (2023)120989.
- [22] Р.Нематирад, А.Пахва, Б.Натараджан, Новая статистическая модель для оптимального расчета размеров подключенных к сети фотоэлектрических аккумуляторных систем для снижения пиковой нагрузки и выравнивания суточных профилей нагрузки, *Solar* 4 (1) (2024) 179-208.
- [23] К. Халл, Дж. Вуст, М.Дж. Бойсен и др., Техничко-экономическая оптимизация и оценка зарядных станций с солнечными батареями в условиях ограничений сети при различных уровнях проникновения электромобилей в автопарк, *Appl.Energy* 374 (2024) 123990.
- [24] Т. Р. С. Редди, И. Кумарасами, Интеграция электромобилей в интеллектуальную систему управления энергопотреблением в доме: решение для резервного питания от автомобиля к дому с использованием солнечной энергии, *Int.J.Electric.Electron.Res.*12 (1) (2024) 253-261.
- [25] М. Халид, Дж. Тхакур, С.М. Бхагавати и др., Влияние интеллектуальной зарядки электромобилей в общественных и жилых районах на распределительную электросеть, оснащенную накопителями энергии, *Sustain.Cities Soc.*104 (2024) 105272.
- [26] М. Нур, Дж. П. Чавес-Авила, М. Тронсия и др., Смягчение воздействия коллективной торговли энергией на распределительные сети с учетом договорных тарифов на электроэнергию, *IEEE Access* (2024).

- [27] Дж. С. Парк, С. Хуссейн, Дж. О. Ли и др., Тариф на электроэнергию в зависимости от времени суток (TOU) для системы «автомобиль-сеть» (V2G) для минимизации мощности зарядной станции, *Int.J.Electr.Power Energy Syst.* 161 (2024) 110209.
- [28] А. К. Кармакер, С. Р. Ислам, Технология передачи энергии для зарядных станций электромобилей с учетом возобновляемых ресурсов, в: Международная конференция по автоматизации, управлению и мехатронике для индустрии 4.0 (ACMI), IEEE, 2021, стр. 1-5.
- [29] Р. Маноджкумар, К. Кумар, С. Гангули и др., Сглаживание пиковых нагрузок на основе правил с использованием оптимизации уровня «ведущий-ведомый» в микросети, питаемой дизельным генератором, *IEEE Trans.Power Syst.* 38 (3) (2022) 2177-2188.
- [30] А. К. Кармакер, М. А. Хоссейн, Х. Р. Пота и др., Система управления энергией для гибридной зарядной станции для электромобилей на основе возобновляемых источников энергии, *IEEE Access* 11 (2023) 27793-27805.
- [31] Н. Горбани, А. Касаеян, А. Тоопшекян и др., Оптимизация гибридной ветро-фотоэлектрической-аккумуляторной системы с использованием GA-PSO и MOPSO для снижения затрат и повышения надежности, *Energy* 154 (2018) 581-591.
- [32] Д. Гуанцянь, К. Бекхрад, П. Азарирах и др., Гибридный алгоритм оптимизации моделирования независимых от сети гибридных солнечных/ветровых систем на основе биодизельного топлива, *Renew.Energy* 122 (2018) 551-560.
- [33] С. Фарах, Г. Б. Андресен, Инвестиционная оптимизация параметров проектирования системы хранения энергии в гибридной возобновляемой энергетической системе, подключенной к сети, *Appl.Energy* 355 (2024) 122384.
- [34] Ю. Элаузи, А. Эль Фадар, О. Б. Ачкари, Оценка производительности 3Е множественных сценариев энергоснабжения на основе фотоэлектрических, ветротурбинных, аккумуляторных и водородных систем, *J.Storage Mater.* 99 (2024) 113378.
- [35] Б. Швета, Г. С. Бабу, Г. Маллешам, Интеллектуальная солнечная фотоэлектрическая система, подключенная к сети и автономная система UPQC для нагрузки зарядной станции электромобилей, *Results Control Optim.* 15 (2024) 100420.
- [36] Р. Маноджкумар, К. Кумар, С. Гангули и др., Компенсация ошибки прогноза чистой нагрузки для сглаживания пиков в подключенной к сети системе хранения энергии на основе фотоэлектрических элементов, *IEEE Trans.Power Syst.* 39 (2) (2023) 4372-4381.
- [37] О. Ганди, В. Чжан, Д.С. Кумар и др., Ценность прогнозов солнечной энергии и стоимость их ошибок: обзор, *Renew.Sustain.Energy Rev.* 189 (2024) 113915.
- [38] С.К. Коллималла, М.К. Мишра, Н.Л. Нарасамма, Разработка и анализ новой стратегии управления для системы хранения энергии на основе батарей и суперконденсаторов, *IEEE Trans.Sustainable Energy* 5 (4) (2014) 1137-1144.
- [39] Дж. Лопес, С.И. Селеме мл., П.Ф. Доносо и др., Стратегия цифрового управления понижающим преобразователем, работающим в качестве зарядного устройства для автономных фотоэлектрических систем, *Sol.Energy* 140 (2016) 171-187.
- [40] В. Даш, П. Баджпай, Стратегия управления питанием для автономной гибридной системы солнечных фотоэлектрических элементов, топливных элементов и батарей, *Sustainable Energy Technol.Assess.* 9 (2015) 68-80.

- [41] Н. Дж. Т. де Карвалью, А. О. Салазар, А. С. Лок, Схема управления на основе аналоговых данных, применяемая в автономных фотоэлектрических системах для распределения постоянного тока, *Renew.Sustain.Energy Rev.*110 (2019) 236-246.
- [42] Х. Полат, Ф. Хоссейнабади, М.М. Хасан и др., Обзор быстрых зарядных устройств постоянного тока с системами хранения энергии для электромобилей: топология, батарея, управление, ориентированное на надежность, и перспективы охлаждения, *Batteries* 9(2) (2023) 121.
- [43] М.Абдель-Бассет, Х.Хаваш, Р.К.Чакраборти и др., PV-Net: Инновационный подход глубокого обучения для эффективного прогнозирования краткосрочного производства фотоэлектрической энергии, *J.Clean.Prod.*303(2021) 127037.
- [44] П.В.Маех, С.Мейаппан, Р.Алла, Отслеживание точки максимальной мощности на основе машинного обучения с использованием регрессии опорных векторов для солнечных фотоэлектрических систем, *Int.J.Electric.Comput.Eng.Syst.*14 (1) (2023) 100-108.
- [45] У.К.Дас, К.С.Тей, М.Сейедмахмудян и др., Модель на основе SVR для прогнозирования выработки электроэнергии фотоэлектрическими системами в различных погодных условиях, *Energies* 10 (7) (2017) 876.
- [46] Д.Ван дер Меер, Г.Р.К. Мули, Г.М.Е. Мули и др., Система управления энергией с прогнозированием выработки электроэнергии фотоэлектрическими системами для оптимальной зарядки электромобилей на рабочем месте, *IEEE Trans.Ind.Inf.*14(1) (2016)311-320.
- [47] Л.Ши, Ю.Лиу, П.Си и др., Многорежимная система использования солнечной фотоэлектрической энергии для зданий на плато в сельской местности, *Energ.Conver.Manag.*311 (2024) 118534.

Получено 8 октября 2024 г.; отредактировано 4 января 2025 г.; принято 17 января 2025 г.

Экспертная оценка проводится под руководством компании Global Energy Interconnection Group Co.Ltd.

*** Ответственный автор**

Адреса электронных почт: utpal@duet.ac.bd (У.К.Дас), a.karmaker@adfa.edu.au (А.К. Кармакер).

Эта статья переведена из журнала <Global Energy Interconnection> (ISSN: 2096-5117), выпуск 3, 2025 г. Оригинальное название статьи:< Optimizing PV power utilization in standalone battery systems with forecast-based charging management strategy>. Перевод предоставляется исключительно для справки; преимущественную силу имеет оригинал: <https://doi.org/10.1016/j.gloe.2025.01.006>

2096-5117/© 2025 Global Energy Interconnection Group Co.Ltd. Издательские услуги предоставлены Elsevier B.V. от имени KeAi Communications Co.Ltd.

Это статья с открытым доступом, распространяемая по лицензии CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Утпал Кумар Дас — профессор кафедры электротехники и электроники (EEE) Даккского инженерно-технологического университета (DUET), Газипур, Бангладеш. В 2019 году он получил степень доктора наук в области управления электроэнергией в Университете Малайзии, Куала-Лумпур, Малайзия. До этого, в 2008 и 2015 годах, он получил степень бакалавра и магистра в области EEE в DUET, Газипур, Бангладеш. Его научные интересы включают в себя возобновляемую энергетику, силовые электронные преобразователи и энергоэффективность. Доктор Дас является активным членом Института инженеров Бангладеш (IEB) и IEEE.



Ашиш Кумар Кармакер получает степень доктора наук в области электротехники в Университете Нового Южного Уэльса, Канберра, Австралия. До этого он получил степень бакалавра и магистра в области электротехники в Даккском инженерно-технологическом университете, Газипур, Бангладеш. Его исследовательские интересы включают в себя электромобили и интеграцию возобновляемых источников энергии в распределительные сети. Г-н Ашиш является активным членом Института инженеров Бангладеш (IEB) и IEEE.