

Труды МАИ. 2023. № 129
Trudy MAI, 2023, no. 129

Научная статья
УДК 539.422.52
DOI: [10.34759/trd-2023-129-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-24)

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТОЧКОЙ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ВЕТРО- СОЛНЕЧНОЙ ГЕНЕРИРУЮЩЕЙ УСТАНОВКИ С НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ

**Абдали Лаит Мохаммед Абдали¹✉, Борис Анатольевич Якимович²,
Виктория Викторовна Сяктерева³, Владимир Владиславович Кувшинов⁴,
Наталья Владиславовна Морозова⁵**

^{1,2,4}Севастопольский государственный университет,
Севастополь, Россия

³Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
Ижевск, Россия

⁵Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Россия

¹laith_2210@yahoo.com✉

²yakimovich52@gmail.com

³syaktereva_vika@mail.ru

⁴kuvshinov.vladimir@gmail.com

⁵innat.m@mail.ru

Аннотация: Системы прямого преобразования солнечной энергии на основе полупроводниковых фотоэлементов уже несколько десятилетий используются для авиационно-космической техники и наземных потребителей. В представленной работе была разработана информационно-управляющая система для комбинированной установки генерации электрической энергии при помощи преобразования солнечной и ветровой энергии. Комбинированная система, использующая два или более устойчивых источника энергии, известна как гибридная система возобновляемой энергии. Она поможет производить энергию непрерывно и позволит использовать один источник при отсутствии других, что является преимуществом. В исследовании предложена позиционирование гибридной системы преобразования энергии с использованием фотоэлектрических панелей, ветровой генерирующей установки и аккумуляторных батарей. В представленной работе была проведена оптимизация системы управления предложенной гибридной ветро-солнечной системы что значительно повысило её эффективность использования и надёжность работы. Исследуя выходные характеристики устройств генерирующей электростанции, была получена модель выходной мощности фотоэлектрической и ветровой энергии, а также модель зарядки и разрядки аккумуляторов. При разработке модели были использованы такие параметры, как среднегодовая чистая прибыль в качестве функции цели и характеристик региона и области, планируемого масштаба, взаимодополняющих свойств, коэффициента использования ресурсов и стабильности выхода в качестве ограничений. При помощи предложенного метода была построена модель для гибридной системы

фотоэлектрического преобразования, ветровой генерации и аккумуляирования энергии. Результаты эксперимента демонстрируют жизнеспособность и надежность этого подхода. Благодаря включению доходов от торговли выбросами модель становится более точной. Идеальный результат также более полезен. Распределение солнечных фотоэлектрических панелей влияет на общую выработку электроэнергии гибридной системой, как показано в статье. В ней используется солнечная панель, соединенная с гибридным контроллером и ветряной турбиной. Результаты показали, что непрерывное производство электроэнергии возможно, когда солнечная панель соединена с ветровой турбиной, что улучшает ее выходную мощность.

Ключевые слова: возобновляемая энергия, система накопления энергии, гибридная ветро-солнечная установка, аккумуляторная батарея, ветровая турбина, фотоэлектрическая система.

Для цитирования: Абдали Л.М., Якимович Б.А., Сяктерева В.В., Кувшинов В.В., Морозова Н.В. Оптимизация системы автоматического управления точкой максимальной мощности для ветро-солнечной генерирующей установки с накопителями энергии // Труды МАИ. 2023. № 129. DOI: [10.34759/trd-2023-129-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-24)

Original article

OPTIMIZATION OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR THE MAXIMUM POWER POINT FOR A WIND-SOLAR GENERATING PLANT WITH ENERGY STORAGE

**AbdAli Layth Mohammed AbdAli¹✉, Boris A. Yakimovich²,
Victoria V. Syaktereva³, Vladimir V. Kuvshinov⁴, Natalia V. Morozova⁵**

^{1,2,4}Sevastopol State Technical University,
Sevastopol, Russia

³Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Izhevsk, Russia

⁵Moscow State University of Technology "Stankin", MSUT "Stankin",
Moscow, Russia

¹laith_2210@yahoo.com✉

²yakimovich52@gmail.com

³syaktereva_vika@mail.ru

⁴kuvshinov.vladimir@gmail.com

⁵innat.m@mail.ru

Abstract: Direct solar energy conversion systems based on semiconductor photovoltaic cells have been employed for decades for aerospace technology and ground-based consumers. The article presents the developed information and control system for combined electric energy generating installation by solar and wind energy conversion. A combined system, which employs two or more stable energy sources, is known as a hybrid renewable energy system. It will facilitate uninterrupted energy generation and allow employing one source in the absence of the other, which is its irrefutable advantage. The study proposes the hybrid energy conversion positioning, which includes photovoltaic panels, wind power generator and batteries. The presented work performed control system optimization of the proposed hybrid wind-solar system, which enhanced significantly efficiency of its application and performance

reliability. The model of photovoltaic and wind output power, as well as the model of the battery charging and discharging were obtained by studying the output characteristics of the generating power station. Parameters such as the average annual net profit as a target function and region and area characteristics, planned scale, complementary properties, resources utilization factor and stability of the output as limitations were used while development. A model for the hybrid system of photovoltaic conversion, wind generation and energy storage was constructed employing the proposed method. The results of the experiment demonstrate the proposed approach validity and robustness. The emissions trading revenues inclusion makes the model more accurate. The ideal result is more useful as well. As the article shows, the solar photovoltaic panels distribution affects the overall power generation of the hybrid system. It employs a solar panel connected with a hybrid controller and a wind turbine. The results revealed that continuous power generation was possible when the solar panel was connected with the wind turbine, which improved its power output.

Keywords: Renewable Energy, Storage System, hybrid solar-wind energy, Battery Energy, wind turbine, photovoltaic system

For citation: AbdAli L.M., Yakimovich B.A., Syaktereva V. V., Kuvshinov V.V., Morozova N.V. Optimization of the automatic control system for the maximum power point for a wind-solar generating plant with energy storage. *Trudy MAI*, 2023, no. 129. DOI: [10.34759/trd-2023-129-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-24)

Введение

Первые энергетические фотоэлектрические установки прямого преобразования солнечной энергии использовались в авиационно-космической промышленности, системы электрической генерации для орбитальных станций и космических кораблей. Эти системы, назывались солнечными батареями, и представляли из себя кремниевые полупроводниковые фотопреобразователи, при этом они были основными источниками энергии для космических аппаратов и их экипажей. В настоящее время эти системы повсеместно используются не только для авиационно-космических аппаратов, но и для генерации электроэнергии наземных объектов и сетей электроснабжения, по всему миру работают огромные мощности солнечных электростанций. Основной проблемой их использования является непостоянство генерации электрической энергии. Представленная работы рассчитана на то, чтобы по возможности выработать необходимые устройства управления и надежности работы солнечных установок, которые могут уменьшить негативные процессы, связанные с непостоянной генерацией энергии и увеличить эффективность использования существующих мощностей солнечной энергетики.

В настоящее время основными видами источников энергии являются ископаемые виды топлива и возобновляемые источники. Многие типы ископаемого топлива имеют ограниченный ресурс и подвергают риску состояние окружающей среды, ухудшают экологию и способствует глобальному потеплению. Возобновляемые источники могут быть представлены такими видами энергии, такими как геотермальная, приливная,

солнечная, ветровая и энергия биомассы. Важно развивать современные возобновляемые источники энергии (ВИЭ) [1], так как при их использовании заметны положительные эффекты для окружающей среды, такие как снижение токсичных выбросов, углекислого газа, твёрдых частиц (пепел, сажа и др.). И это доступно за счет энерго замещения работы установок, работающих на ископаемом топливе возобновляемой энергетикой [2], например, ветровой и солнечной энергетикой. Развитие этих направлений электроэнергетики ограничено случайностью генерации и колебаниями выходной мощности [3-5]. Гибридная ветро-фотоэлектрическая система с накопителями энергии использует дополнительную систему для уменьшения неблагоприятного воздействия генерируемой ветровой и солнечной мощности на энергосистему. Гибридная фотоэлектрическая ветро-аккумулирующая система — это своего рода гибридная энергосистема для достижения переключения пиковой нагрузки, сочетающая ресурсы энергии ветра и Солнца [6-8]. Перед строительством станции решается проблема оптимизации размещения гибридной системы фотоэлектрических батарей, ветротурбин и накопителей энергии в соответствии с климатическими и региональными характеристиками, а также характером устройств [9],[10]. Предыдущие исследования были сосредоточены на минимизации затрат, в то время как в этой работе в качестве целевой функции используется максимизация среднегодового чистого дохода, что может лучше отражать преимущества электростанций [11]. В работе была построена модель ветровых турбин, фотоэлектрических устройств и батарей, в первую очередь, в соответствии со статистическими данными и выходными характеристиками

[12-14]. Модель размещения гибридной фото-ветро-аккумулялирующей системы строится в объектной функции со среднегодовым чистым доходом и ограничениями с планируемым масштабом и площадью [15].

Структура гибридной системы

Выработка как ветровой, так и солнечной энергии очень зависит от погодных условий. Таким образом, ни один источник энергии не способен обеспечить экономически эффективное и надежное энергоснабжение. Комбинированное использование нескольких источников энергии может быть жизнеспособным способом достижения компромиссных решений [16]. При использовании комбинации возобновляемых систем возможны колебания мощности. Чтобы смягчить или даже свести на нет эти колебания, можно использовать технологии накопления энергии, например, аккумуляторные батареи. Правильный размер системы хранения зависит от конкретного объекта и зависит от количества возобновляемой генерации и нагрузки [17].

Необходимая аккумулялирующая способность может быть сведена к минимуму, если для данной площадки используется правильное сочетание ветровой и солнечной генерации. Структура предлагаемой гибридной фотоэлектрической и ветровой энергосистемы показана на рис.1 [18].

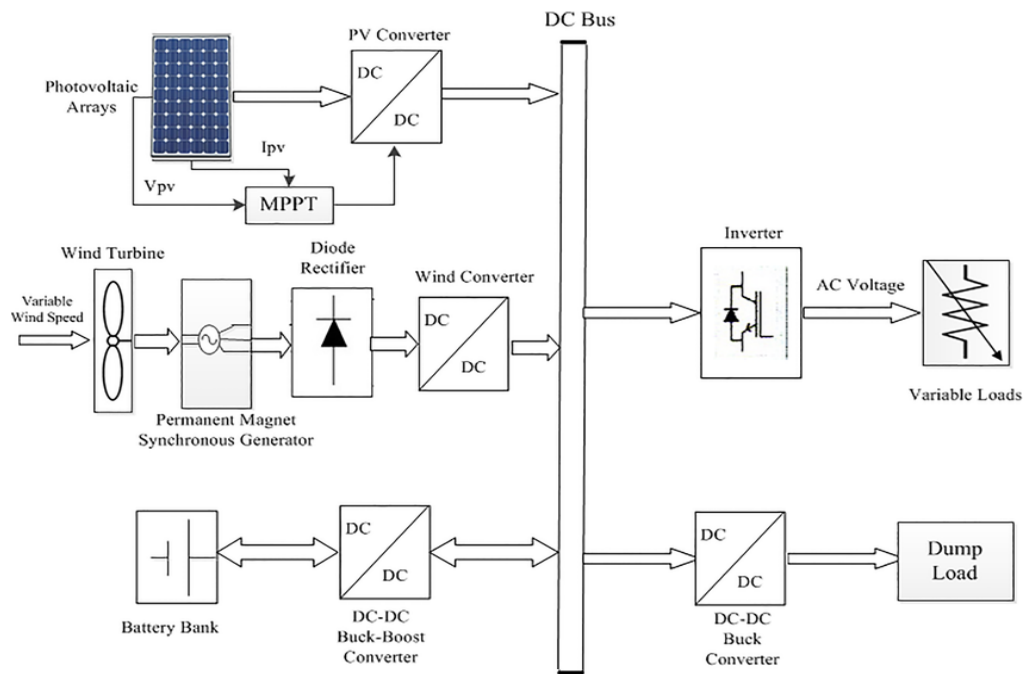


Рис. 1. Блок-схема гибридной системы фотоэлектрического и ветрового генераторов

Fig. 1. The hybrid Wind-Solar and battery Block Diagram

Поскольку в большинстве электроприборов используется источник питания переменного тока, перед нагрузкой используется инвертор. Чтобы гарантировать нормальную работу инвертора, используется сброс нагрузки для потребления избыточной энергии, вырабатываемой системой. Трекеры пиковой мощности будут поддерживать работу фотоэлектрической батареи и ветрогенератора в рабочих точках максимальной мощности. Предлагаемый метод заключается в оптимальном размере гибридной фотоэлектрической и ветровой энергетической системы для электрификации жилого дома в удаленном районе, как показано на рис. 2 [19-21].



Рис. 2. Принципиальная схема гибридной солнечной, ветровой и накопительной системы выработки электроэнергии для дома.

Fig. 2. Schematic circuit for the hybrid solar–wind–battery power generation system for a house

Модель системных устройств

Ветровая турбина

Выходная мощность ветровой турбины определяется скоростью ветра на высоте ротора (состоит из ступицы и лопастей) и выходной характеристикой турбины. Обычно сначала следует рассчитать скорость ветра на высоте ротора, а затем рассчитать выходную мощность ветровой турбины в соответствии с кривой мощности, которая описывается как:

$$P_w(t) = \begin{cases} 0, & v(t) \leq v_{CIN} \text{ или } v(t) \geq v_{COUT} \\ P_{WT}, & v_{RAT} \leq v(t) \leq v_{COUT} \\ P_{WT} \frac{v(t)^2 - v_{CIN}^2}{v_{RAT}^2 - v_{CIN}^2}, & v_{CIN} \leq v(t) \leq v_{RAT} \end{cases} \quad (1)$$

где $P_w(t)$ – выходная мощность в момент времени T , P_{WT} – номинальная мощность ветроустановки, $V(T)$ – скорость ветра на высоте ступицы в момент времени T , V_{CIN} , V_{RAT} и V_{COUT} – скорость ветра при включении, номинальная скорость ветра и скорость отключения соответственно [22].

В зоне воздействия на турбину производимая мощность выражается как:

$$P_{WT} = \frac{1}{2} \rho \pi C_p (\gamma, \beta)^2 V^3 \quad (2)$$

где V – скорость ветрового потока, β – угол установки лопастей принимаем за 0° , плотность воздуха $\rho=1,25$ кг/м³, C_p – коэффициент использования мощности, равный (0,3-0,59), его функция может быть определена, как отношение линейной скорости вращения конца лопасти к скорости ветрового потока (ветра) и может быть определена как:

$$\gamma = \frac{\omega R}{V} \quad (3)$$

Здесь ω обозначается как частота вращения ротора ветрогенератора [23].

Моделирование массива фотоэлектрических модулей

Солнечная фотоэлектрическая система работает по принципу фотоэлектрического эффекта. Он преобразует солнечную энергию в электрическую благодаря попаданию солнечного света на фотоэлектрическую батарею. На рис. 3 показана базовая модель

эквивалентной схемы солнечной фотоэлектрической системы. Чтобы обеспечить гибкое напряжение и ток, эти фотоэлементы выполнены в виде массива фотоэлектрических модулей [24].

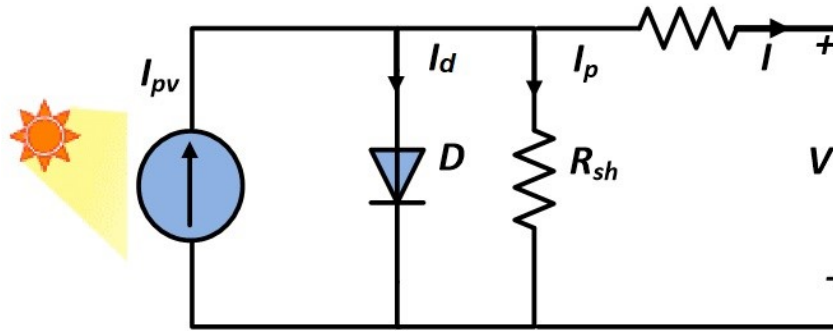


Рис. 3. Эквивалентная схема солнечного элемента

Fig. 3. Equivalent scheme of a solar cell

Эквивалентная схема солнечного элемента состоит из управляемого источника тока, диода, последовательного сопротивления (R_s) и шунтирующего сопротивления (R_p). Антипараллельный диод модифицируется на внешний управляемый источник тока, который размещается антипараллельно исходному источнику [25].

Согласно действующему закону Кирхгофа, имеем:

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (4)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(v+IR_s)}{nKT}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (5)$$

где I_{ph} – фототок или энергетическая освещенность, линейно изменяющаяся в зависимости от излучения при определенной температуре ячейки; I_0 – ток насыщения встречно-параллельного диода, K - постоянная Больцмана ($K = 1,3806503 \times 10^{-23}$ Дж/К); n – коэффициент идеальности или коэффициент излучения.

При соединении ячеек в фотоэлектрическом модуле последовательно, имеем следующее уравнение [26]:

$$I_p = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(v+IR_s)}{N_s n k T}} - 1 \right] - \frac{V + I N_s R_s}{N_P R_P} \quad (6)$$

где N_s количество ячеек, соединенных последовательно.

Модель фотоэлектрической системы была разработана в Matlab Simulink на основе эквивалентной схемы, представленной на рисунке 4. В этом случае I_{ph} является входным параметром, применяемым к источнику тока, и его можно оценить с помощью отношения $I-V$ массива (рис. 2), указанного в приведенном выше уравнении [27].

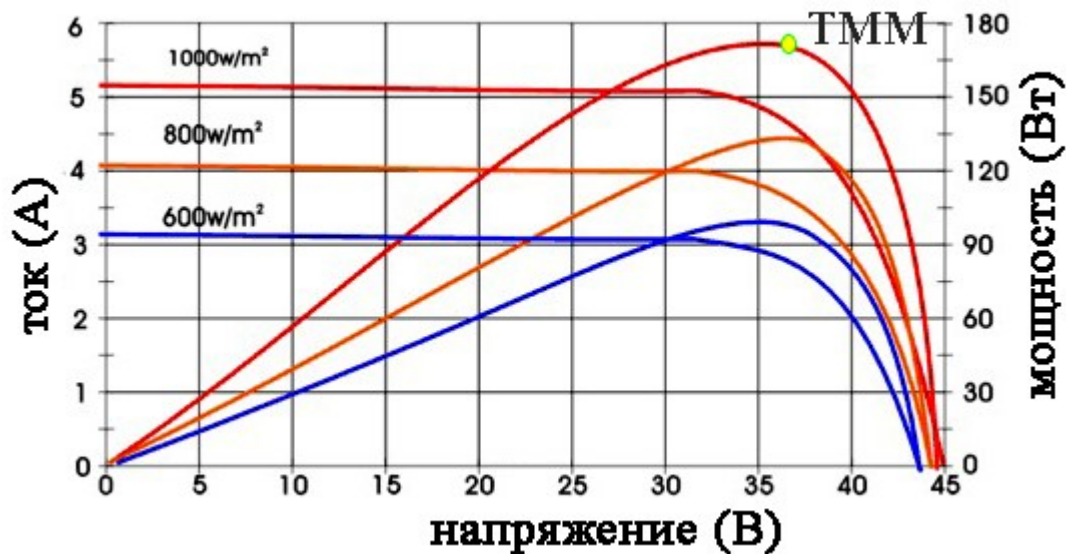


Рис. 4. Характеристики I-V и V-P в стандартных условиях

Fig. 4. The IV and V-P characteristics in Standard Conditions

Модель аккумулятора.

В любой час t состояние заряда батареи $[SOC(t)]$ связано с предыдущим состоянием заряда $[SOC(t-1)]$ и с состоянием производства и потребления энергии

системой в течение времени от $t-1$ к t [28]. В процессе зарядки, когда мощность батареи P_B течет к батарее (т. е. $P_3 > 0$), доступное состояние заряда батареи в час t можно описать следующим образом:

$$SOC(t) = SOC(t-1)(1-\sigma) + \frac{P_3(t)\Delta t\eta_3}{E_{Max.}} \quad (7)$$

$$SOC(t) = SOC(t-1)(1-\sigma) - \frac{P_P(t)\Delta t}{E_{Max.} \eta_P} \quad (8)$$

где $SOC(t)$ - уровень заряда батареи после времени t , σ является саморазрядом батареи, P_3 и P_P являются зарядными и разрядными мощными характеристиками батарей в час t соответственно, Δt - отрезок времени, η_3 и η_P являются эффективностью заряда и разряда аккумулятора соответственно; и $E_{Max.}$ - максимальная емкость батареи [29].

Техника отслеживания точки максимальной мощности (ТММ)

Метод возмущения и наблюдения (P&O) является альтернативным методом определения точки максимальной мощности (MPPT) фотоэлектрического модуля. При его использовании фиксируется напряжение, ток и мощность фотоэлектрического модуля. Этот метод страдает низкой скоростью отслеживания и высокими колебаниями вокруг ТММ, он прост в устройстве, недорог. Блок-схема P&O MPPT показана на рисунке 5, эта схема постоянного напряжения P&O после приравнивания выходной мощности к ее предыдущему значению.

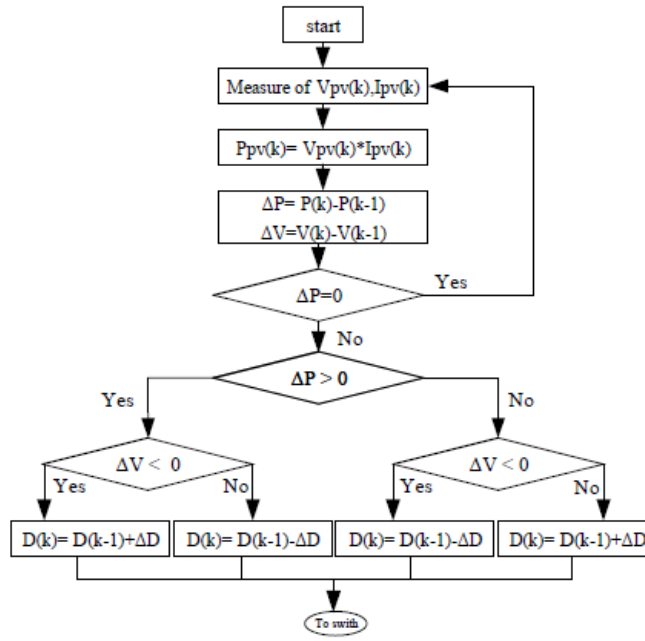


Рис. 5. Блок-схема алгоритма P&O

Fig. 5. The flow chart of the algorithm P&O

Результаты и обсуждение

В данной работе предполагается, что устройство отслеживания пиковой мощности, зарядное/разрядное устройство и распределительные линии идеальны (т.е. они работают без потерь). Также предполагается, что эффективность инвертора η_{inv} постоянна, эффективность заряда батареи η_z равна эффективности полной работы производителя, а эффективность разряда батареи равна 1. Общая генерируемая мощность $P_o(t)$ фотоэлектрической матрицы (панелей) и ветровой турбины за час t , может быть выражена как:

$$P_{\text{доступный}}(t) = P_{PV}(t) + P_{BT}(t) \quad (9)$$

$$P_{\text{избыток}}(t) = P_{\text{доступный}}(t) - P_{\text{НАГ}}(t) \quad (10)$$

Следует отметить, что желаемая потребность в нагрузке $P_H(t)$ в любой час t , может быть удовлетворена или не удовлетворена в соответствии с соответствующими значениями общей генерируемой мощности $P_O(t)$ и доступного SOC батареи (t) при этом часе. Мы можем показать управление генерацией энергии блок-схемой, представленной на рисунке 6:

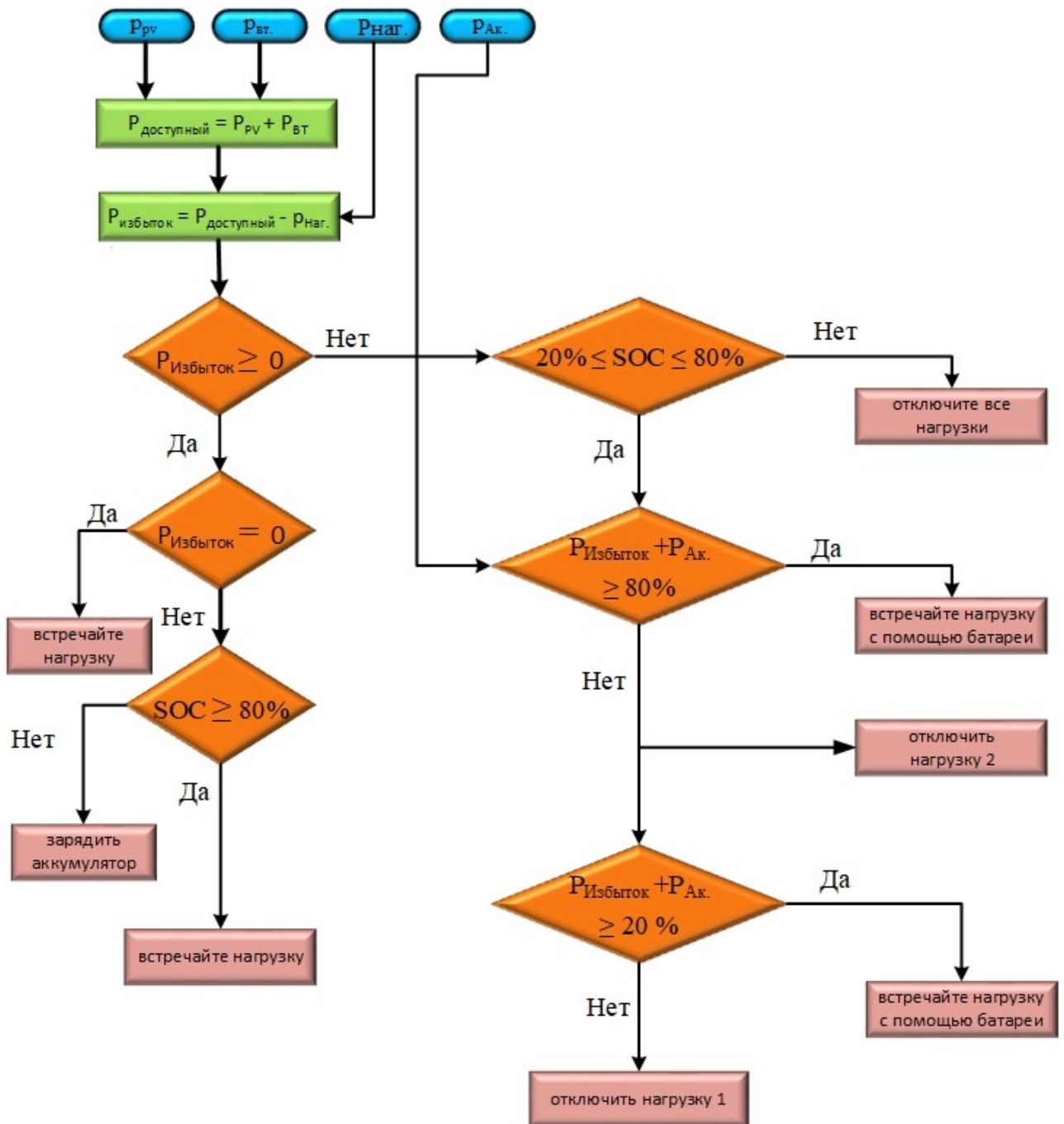


Рис. 6. Предлагаемая блок-схема системы управления энергопотреблением

Fig. 6. The proposed block diagram of the energy management system

Результаты исследований

При проведении исследований была разработана и внедрена гибридная система фотоэлектрических панелей и ветротурбин и аккумуляторных батарей, используемых для энергоснабжения жилого дома. В течение месяцев с апреля по май 2022 года постоянно собирались данные и проводились интересные наблюдения. Предложенные технологии используются для выработки экологически чистой энергии, в достаточно больших объёмах, из возобновляемых ресурсов, таких как ветер, солнечная радиация и др. В результате роста спроса на электроэнергию увеличивается и количество отказов в работающих генерирующих системах, поэтому устойчивые нагрузки могут быть обеспечены также возобновляемыми источниками энергии. Для гибридной ветро-фотоэлектрической энергетической системы предлагается новая топология преобразователя. Реалистичное производство электроэнергии становится возможным благодаря объединению энергии Солнца и ветра. Нетрадиционные источники энергии, также известные как возобновляемые источники энергии, постоянно пополняются за счет природных процессов. Лучшим вариантом для производства чистой энергии является гибридный подход. Естественная гибридная генерация электроэнергии стала возможной за счет объединения солнечной и ветровой энергии. Погода в конкретном локальном географическом регионе в первую очередь связана с более важными возобновляемыми источниками энергии, ветровой и солнечной энергией. Однако погода

– непредсказуемая, беспорядочная система. Расширение производства энергии из возобновляемых источников энергии и переход к открытым рынкам электроэнергии — это две тенденции, которых придерживаются многие страны при проектировании и планировании своих общественных электрических систем. Эти две закономерности увеличивают как количество абонентов в системе, так и степень неопределенности в равновесии между генерацией и спросом, что влияет на общественные сети. Использование возобновляемых источников энергии снижает экономические затраты за счет меньшего потребления топлива, а также сокращает выбросы парниковых газов. Однако производители электроэнергии имеют более высокий риск сбоев и предлагают услуги более низкого качества, если у них есть доступ к большему количеству возобновляемых источников энергии. Увеличение резерва мощности на основе градиентных систем быстрого реагирования может снизить этот риск. Такие системы, как дизельные или гидравлические, производят энергию с высокой скоростью изменения, что подходит для балансировки частых резких и непредсказуемо меняющихся условий производства электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии. В результате снижение стоимости топлива, вызванное использованием возобновляемых источников энергии, приведет к увеличению стоимости электрических сетей в глобальном масштабе. Общественные электрические сети контролируются и планируются на различных уровнях, начиная от непосредственного, связанного с регулированием частоты и напряжения, и заканчивая годовым планированием. Национальные органы управления электроэнергетикой

каждой страны, а также наднациональные организации занимаются разработкой точных правил для этих уровней.

Прогнозирование мощности было включено национальными органами управления электроэнергетикой в свои регулирующие нормы, которые направлены на поддержание качества энергоснабжения.

Для планирования электрической системы необходим ряд уровней, относящихся к различным временным масштабам, а также к прогнозированию погоды. Для регулирования качества электроэнергии также необходимо несколько временных шкал. Это в первую очередь связано с регулированием напряжения и частоты в очень коротком масштабе времени, но в долгосрочном масштабе это в первую очередь связано с балансом мощности между производителями энергии и нагрузками потребителей. К качеству питания можно подходить с различных точек зрения в зависимости от временных рамок и специфики устройства. В этой статье рассматривается малодетализированное кратковременное накопление энергии, которое колеблется от нескольких минут до нескольких недель.

На рисунках 7 и 8 представлены результаты исследований, показана выработка электроэнергии гибридной системой в апреле и мае.

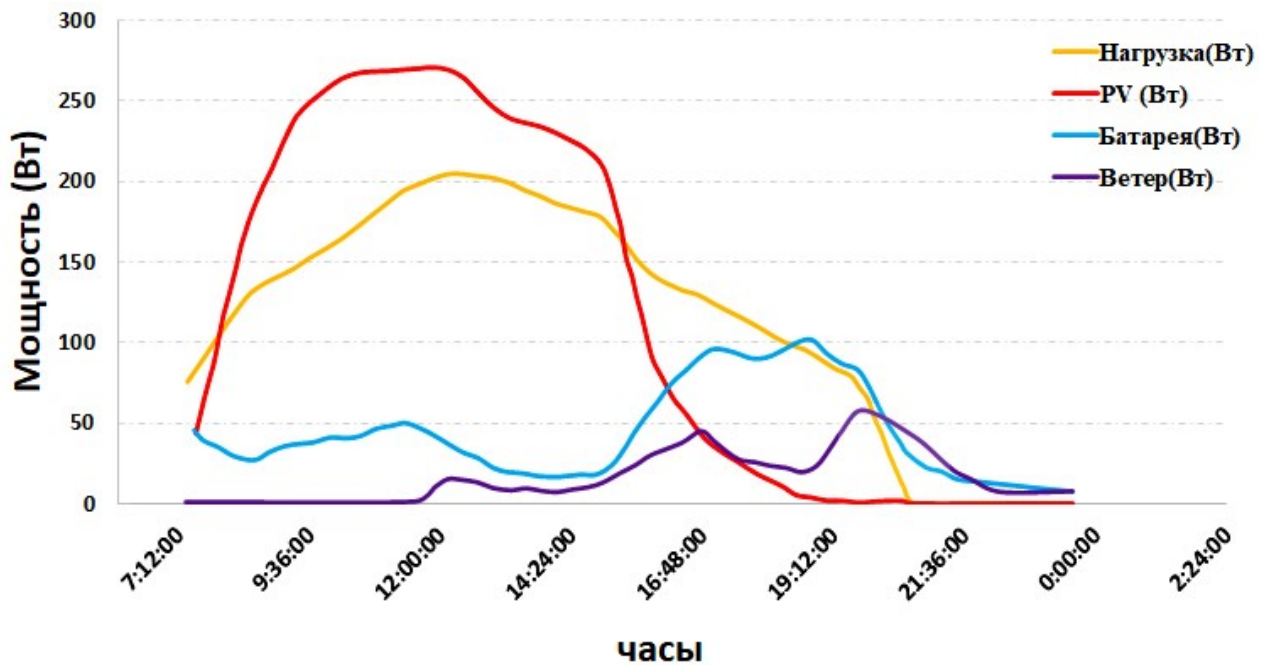


Рис. 7. Средняя выработка электроэнергии гибридной системой в понедельник, 18 апреля 2022 г.

Fig. 7. Average hybrid power generation during monday 18.april.2022.

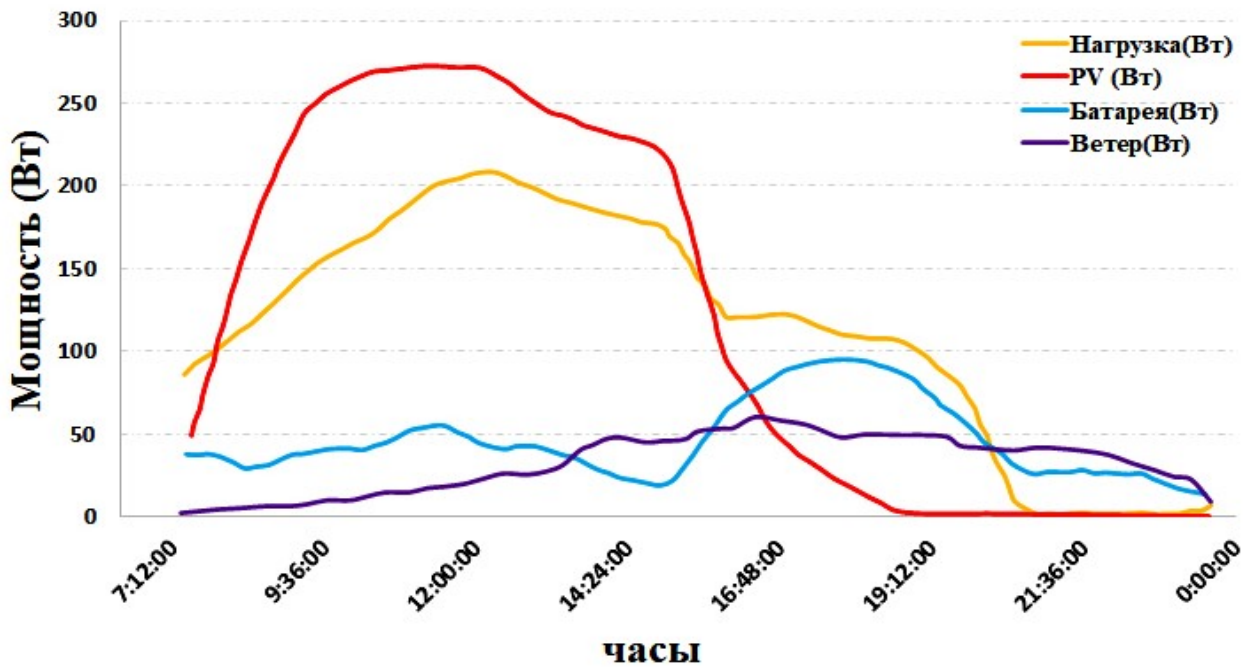


Рис. 8. Средняя выработка электроэнергии гибридной системой 18 Мая 2022 г.

Fig. 8. Average hybrid power generation during 18.May.2022.

Состояние заряда батареи (SOC) описано на рисунке 9. Видно, что заряд батареи всегда поддерживался в пределах безопасного диапазона, а мощность батареи управлялась надлежащим образом. Очевидно, что использование предложенной стратегии приводит к значительному снижению среднего и максимального коэффициентов колебаний. Это однозначно свидетельствует о том, что предложенный подход может успешно сгладить колебания мощности, производимые гибридной системой.

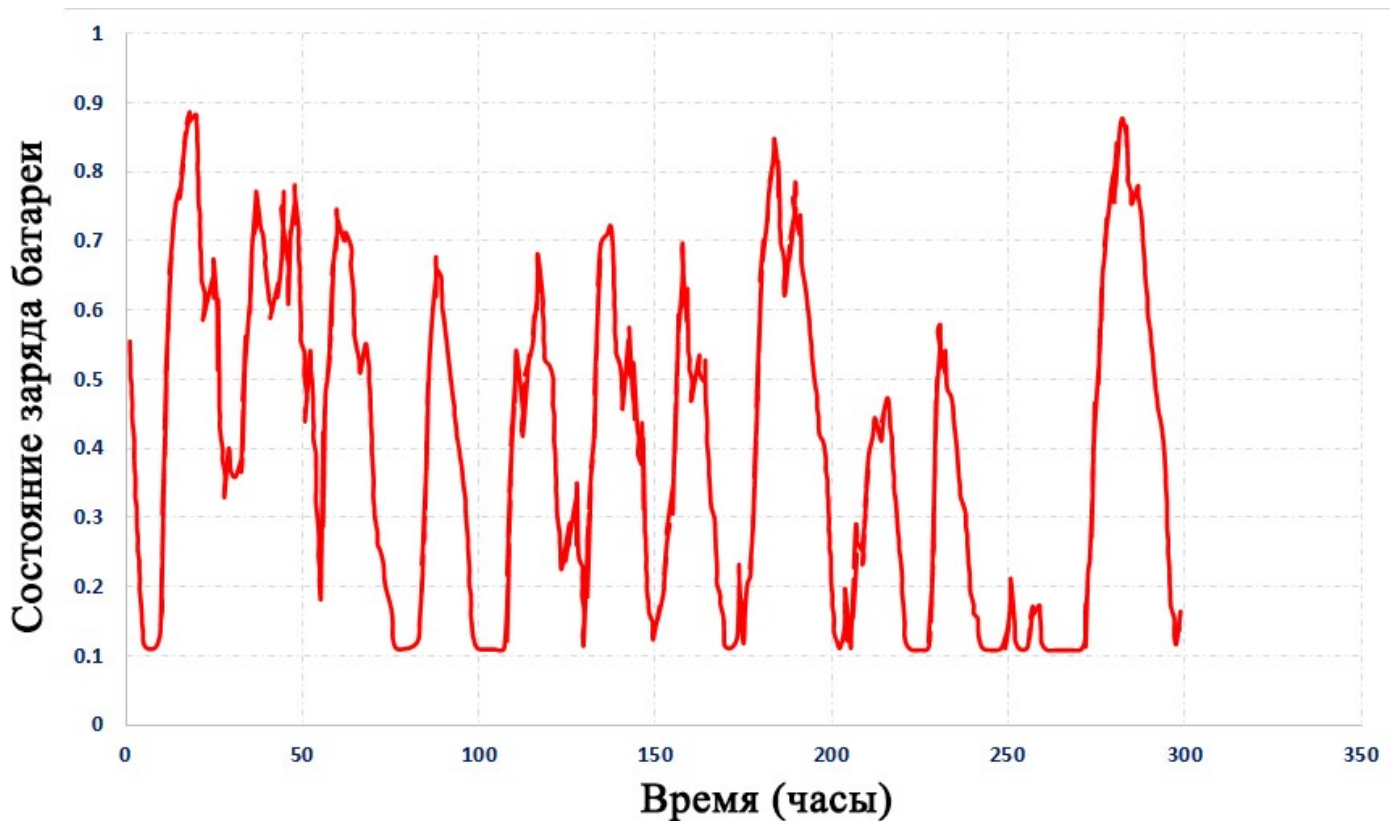


Рис. 9. Характеристики состояния заряда батареи

Fig. 9. The characteristics of battery state of charge

При проведении экспериментальных исследований, в городе Багдад, столицы Республики Ирак, был построен лабораторный проект автономного энергоснабжения на основе системы возобновляемой энергии, чтобы изучить возможности управления и повышения эффективности таких систем в реальных условиях. В качестве первичных источников энергии использовались фотоэлектрические батареи и ветрогенераторы, а для промежуточной буферизации энергии была выбрана аккумуляторная батарея глубокого цикла. Корреляция между SOC и напряжением аккумуляторной батареи на каждом временном шаге была определена экспериментальным путем, чтобы быть включенной в новый теоретический инструмент моделирования, что является инновационным развитием и подходом к моделированию гибридных систем. Экспериментально были смоделированы два различных примера, характеризующихся различными нагрузками. Экспериментальный процесс показал, что электрическая нагрузка типичного жилого дома может быть покрыта за счёт работы ветро-солнечной генерирующей станции с системой накопления энергии.

Заключение

При проведении данной работы были проведены экспериментальные исследования и получены необходимые результаты, по которым можно сделать следующие основные выводы:

– Солнечно-ветровые системы способны значительно увеличить эффективность использования сгенерированной энергии для электроснабжения потребителей, в отличие раздельного применения фотоэлектрических установок и ветровых турбин.

– Системы аккумулирования энергии способны значительно уменьшить негативные последствия непостоянства работы ветровых и солнечных систем генерации.

– Предложенные в работе алгоритмы и методы информационного управления гибридной ветро-солнечной системой позволяют значительно повысить эффективность использования сгенерированной энергии и обеспечить надёжную работу энергокомплексов.

– Проведенные эксперименты по управлению работой гибридной системы позволяют говорить об увеличении надёжности работы исследуемой установки при использовании предложенных методов определения точки максимальной мощности.

Список источников

1. Khare V., Nema S. and Baredar P. Solar-wind hybrid renewable energy system // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, vol. 58, pp. 23-33, URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.223>
2. Abo-Elyousr F.K., Abdelshafy A.M., Abdelaziz A.Y. TMMT-Based Particle Swarm and Cuckoo Search Algorithms for PV Systems. In Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems, Springer, Cham, Switzerland, 2020, pp. 379-400. DOI:[10.1007/978-3-030-05578-3_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05578-3_14)

3. Волков А.С. Разработка имитационной модели канала с группирующимися ошибками // Труды МАИ. 2023. № 128. <https://trudymai.ru/published.php?ID=171396>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-12](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-12)
4. Абдали Л.М., Исса Х.А., Аль-Малики М.Н., Кувшинов В.В., Бекиров Э.А. Исследование режимов работы комбинированных солнечно-ветровых установок для обеспечения уличного освещения // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № 25 (77). С. 75-85.
5. Ибрагимов Д.Н., Берендакова А.В. Метод построения и оценивания асимптотических множеств управляемости двумерных линейных дискретных систем с ограниченным управлением // Труды МАИ. 2022. № 126. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=169003>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-17](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-17)
6. Исса Х.А., Абдали Л.М., Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Морозова Н.В., Федотикова М.В. Сравнение эффективности различных методов управления энергетическими параметрами фотоэлектрических систем // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171405>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-17](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-17)
7. Senol M., Abbasoglu S., Kukrer O., Babatunde A. A guide in installing large-scale PV power plant for self-consumption mechanism // Solar Energy, 2016, vol. 132, pp. 518-537. DOI: [10.1016/j.solener.2016.03.035](https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.035)
8. Абдали Л.М., Аль-Малики М.Н., Исса Х.А., Якимович Б.А., Кувшинов В.В. Использование метода отслеживания точки максимальной мощности для увеличения

эффективности работы фотоэлектрических установок // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20. № 4. С. 106–116. DOI: [10.22213/2410-9304-2022-4-106-116](https://doi.org/10.22213/2410-9304-2022-4-106-116)

9. Соколов Н.Л. Анализ комбинированных способов формирования орбит искусственного спутника планет // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=69701>

10. Mehrjerdi H. Peer-to-peer home energy management incorporating hydrogen storage system and solar generating units // Renewable Energy, 2020, vol. 156, pp. 183-192. DOI: [10.1016/j.renene.2020.04.090](https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.090)

11. Abd Ali L.M., Al-Rufae F.M., Kuvshinov V.V. Study of Hybrid Wind - Solar Systems for the Iraq Energy Complex // Applied Solar Energy, 2020, vol. 56, pp. 284-290. URL: <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>

12. Amiry H. Design and implementation of a photovoltaic I-V curve tracer: Solar modules characterization under real operating conditions // Energy Conversion and Management, 2018, vol. 169, pp. 206-216. DOI: [10.1016/j.enconman.2018.05.046](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.046)

13. Тепликова В.И., Сенцов А.А., Ненашев В.А., Поляков В.Б. Анализ диаграммы направленности плоской многоэлементной активной фазированной антенной решетки // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168189>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-17](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-17)

14. Ibrahim H. and Anani N. Variations of PV module parameters with irradiance and temperature // Energy Procedia, 2017, vol. 134, pp. 276-285. DOI: [10.1016/j.egypro.2017.09.617](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.617)

15. Sachit M.S., Shafri H.Z.M., Abdullah A.F., Rafie A.S.M. Combining Re-Analyzed Climate Data and Landcover Products to Assess the Temporal Complementarity of Wind and Solar Resources in Iraq // Sustainability, 2021, vol. 14(1), pp. 388. DOI:[10.3390/su14010388](https://doi.org/10.3390/su14010388)
16. Al-Waeli, Ali AK, Kadhem A. Al-Asadi, Mariyam M. Fazleena. The impact of Iraq climate condition on the use of solar energy applications in Iraq // International Journal of Science and Engineering Investigations, 2017, no. 68, pp. 64-73.
17. Yin O.W. and Babu B.C. Simple and easy approach for mathematical analysis of photovoltaic (PV) module under normal and partial shading conditions // Optik, 2018, vol. 169, pp. 48-61. DOI:[10.1016/j.ijleo.2018.05.037](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.05.037)
18. Aurel Gontean, Septimiu Lica, Szilard Bularka, Roland Szabo, Dan Lascu. A Novel High Accuracy PV Cell Model Including Self Heating and Parameter Variation // Energies, 2018, vol. 11, pp. 36. DOI:[10.3390/en11010036](https://doi.org/10.3390/en11010036)
19. Xuan Hieu Nguyen, Minh Phuong Nguyen. Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in Matlab/Simulink // Environmental Systems Research, 2015, vol. 4, pp. 24. DOI:[10.1186/s40068-015-0047-9](https://doi.org/10.1186/s40068-015-0047-9)
20. Al-Kayiem H.H., Mohammad S.T. Potential of renewable energy resources with an emphasis on solar power in Iraq // Resources, 2019, vol. 8 (1), pp. 42. DOI [10.3390/resources8010042](https://doi.org/10.3390/resources8010042)
21. Li H., Yang D., Su W. An overall distribution particle swarm optimization mppt algorithm for photovoltaic system under partial shading // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 265-275. DOI: [10.1109/TIE.2018.2829668](https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2829668)

22. Cheboxarov V.V. An Offshore Wind-Power-Based Water Desalination Complex as a Response to an Emergency in Water Supply to Northern Crimea // Applied Solar Energy, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 260-264. URL: <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040030>.
23. Fares D., Fathi M., Mekhilef S. Performance evaluation of metaheuristic techniques for optimal sizing of a stand-alone hybrid PV/wind/battery system // Applied Energy, 2022, vol. 117823, pp. 305-312. DOI:[10.1016/j.apenergy.2021.117823](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117823)
24. Somwanshi D. and Chaturvedi A. Design and Optimization of a Grid-Connected Hybrid Solar Photovoltaic- Wind Generation System for an Institutional Block // International Conference on Artificial Intelligence: Advances and Applications, 2020, pp. 319-326. DOI:[10.1007/978-981-15-1059-5_36](https://doi.org/10.1007/978-981-15-1059-5_36)
25. Hasirci, Habip Yusuf, and Ahmet Mete Vural. Modeling and Simulation of PMSG based Wind-Solar Energy Based Hybrid Energy Conversion System // Global Energy Conference (GEC), 2022, pp. 223-228. DOI: [10.1109/GEC55014.2022.9987169](https://doi.org/10.1109/GEC55014.2022.9987169).
26. Абдали Л.М., Аль-Малики М.Н., Али К.А., Якимович Б.А., Коровкин Н.В., Кувшинов В.В., Соломенникова С.И. Использование гибридных ветро-солнечных систем для энергоснабжения города Аль-Наджаф в Республике Ирак // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25. № 3. С. 82-91. DOI: [10.22213/2413-1172-2022-3-82-91](https://doi.org/10.22213/2413-1172-2022-3-82-91)
27. Vasant Ligade Gitanjali, Vijaya Pawar. Solar-wind hybrid energy system using MPPT // International conference on intelligent computing and control systems, 2017, pp. 595-597. DOI: [10.1109/ICCONS.2017.8250531](https://doi.org/10.1109/ICCONS.2017.8250531)

28. Kumar G.A. Optimal power point tracking of solar and wind energy in a hybrid wind solar energy system // International Journal of Energy and Environmental Engineering, 2022, vol. 13 (1), pp. 77-103. URL: <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00399-9>
29. Yadav A.S., Sanjay Sinha. Solar-Wind Based Hybrid Energy System: Modeling and Simulation // 4th International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE), 2021, pp. 586-570. DOI: [10.1109/RDCAPE52977.2021.9633590](https://doi.org/10.1109/RDCAPE52977.2021.9633590)

References

1. Khare V., Nema S. and Baredar P. Solar-wind hybrid renewable energy system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 58, pp. 23-33, URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.223>
2. Abo-Elyousr F.K., Abdelshafy A.M., Abdelaziz A.Y. *TMMT-Based Particle Swarm and Cuckoo Search Algorithms for PV Systems. In Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems*, Springer, Cham, Switzerland, 2020, pp. 379-400. DOI:10.1007/978-3-030-05578-3_14
3. Volkov A.S. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. URL:<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171396>. DOI: 10.34759/trd-2023-128-12
4. Abdali L.M., Issa Kh.A., Al'-Maliki M.N., Kuvshinov V.V., Bekirov E.A. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'*, 2022, no. 25 (77), pp. 75-85.

5. Ibragimov D.N., Berendakova A.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 126. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=169003>. DOI: 10.34759/trd-2022-126-17
6. Issa Kh.A., Abdali L.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., Morozova N.V., Fedotikova M.V. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171405>. DOI: 10.34759/trd-2023-128-17
7. Senol M., Abbasoglu S., Kukrer O., Babatunde A. A guide in installing large-scale PV power plant for self-consumption mechanism, *Solar Energy*, 2016, vol. 132, pp. 518-537. DOI: 10.1016/j.solener.2016.03.035
8. Abdali L.M., Al'-Maliki M.N., Issa Kh.A., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 106–116. DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-106-116
9. Sokolov N.L. *Trudy MAI*, 2016, no. 87. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=69701>
10. Mehrjerdi H. Peer-to-peer home energy management incorporating hydrogen storage system and solar generating units, *Renewable Energy*, 2020, vol. 156, pp. 183-192. DOI: 10.1016/j.renene.2020.04.090
11. Abd Ali L.M., Al-Rufae F.M., Kuvshinov V.V. Study of Hybrid Wind - Solar Systems for the Iraq Energy Complex, *Applied Solar Energy*, 2020, vol. 56, pp. 284-290. URL: <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>

12. Amiry H. Design and implementation of a photovoltaic I-V curve tracer: Solar modules characterization under real operating conditions, *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 169, pp. 206-216. DOI:10.1016/j.enconman.2018.05.046
13. Teplikova V.I., Sentsov A.A., Nenashev V.A., Polyakov V.B. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168189>. DOI: 10.34759/trd-2022-125-17
14. Ibrahim H. and Anani N. Variations of PV module parameters with irradiance and temperature, *Energy Procedia*, 2017, vol. 134, pp. 276-285. DOI:10.1016/j.egypro.2017.09.617
15. Sachit M.S., Shafri H.Z.M., Abdullah A.F., Rafie A.S.M. Combining Re-Analyzed Climate Data and Landcover Products to Assess the Temporal Complementarity of Wind and Solar Resources in Iraq, *Sustainability*, 2021, vol. 14(1), pp. 388. DOI:10.3390/su14010388
16. Al-Waeli, Ali AK, Kadhem A. Al-Asadi, Mariyam M. Fazleena. The impact of Iraq climate condition on the use of solar energy applications in Iraq, *International Journal of Science and Engineering Investigations*, 2017, no. 68, pp. 64-73.
17. Yin O.W. and Babu B.C. Simple and easy approach for mathematical analysis of photovoltaic (PV) module under normal and partial shading conditions, *Optik*, 2018, vol. 169, pp. 48-61. DOI:10.1016/j.ijleo.2018.05.037
18. Aurel Gontean, Septimiu Lica, Szilard Bularka, Roland Szabo, Dan Lascu. A Novel High Accuracy PV Cell Model Including Self Heating and Parameter Variation, *Energies*, 2018, vol. 11, pp. 36. DOI:10.3390/en11010036

19. Xuan Hieu Nguyen, Minh Phuong Nguyen. Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in Matlab/Simulink, *Environmental Systems Research*, 2015, vol. 4, pp. 24. DOI:10.1186/s40068-015-0047-9
20. Al-Kayiem H.H., Mohammad S.T. Potential of renewable energy resources with an emphasis on solar power in Iraq, *Resources*, 2019, vol. 8 (1), pp. 42. DOI 10.3390/resources8010042
21. Li H., Yang D., Su W. An overall distribution particle swarm optimization mppt algorithm for photovoltaic system under partial shading, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 265-275. DOI: 10.1109/TIE.2018.2829668
22. Cheboxarov V.V. An Offshore Wind-Power-Based Water Desalination Complex as a Response to an Emergency in Water Supply to Northern Crimea, *Applied Solar Energy*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 260-264. URL: <https://doi.org/10.3103/S0003701X19040030>.
23. Fares D., Fathi M., Mekhilef S. Performance evaluation of metaheuristic techniques for optimal sizing of a stand-alone hybrid PV/wind/battery system, *Applied Energy*, 2022, vol. 117823, pp. 305-312. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117823
24. Somwanshi D. and Chaturvedi A. Design and Optimization of a Grid-Connected Hybrid Solar Photovoltaic- Wind Generation System for an Institutional Block, *International Conference on Artificial Intelligence: Advances and Applications*, 2020, pp. 319-326. DOI:10.1007/978-981-15-1059-5_36

25. Hasirci, Habip Yusuf, and Ahmet Mete Vural. Modeling and Simulation of PMSG based Wind-Solar Energy Based Hybrid Energy Conversion System, *Global Energy Conference (GEC)*, 2022, pp. 223-228. DOI: 10.1109/GEC55014.2022.9987169.
26. Abdali L.M., Al'-Maliki M.N., Ali K.A., Yakimovich B.A., Korovkin N.V., Kuvshinov V.V., Solomennikova S.I. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2022, vol. 25, no 3, pp. 82-91. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-82-91
27. Vasant Ligade Gitanjali, Vijaya Pawar. Solar-wind hybrid energy system using MPPT, *International conference on intelligent computing and control systems*, 2017, pp. 595-597. DOI: 10.1109/ICCONS.2017.8250531
28. Kumar G.A. Optimal power point tracking of solar and wind energy in a hybrid wind solar energy system, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2022, vol. 13 (1), pp. 77-103. URL: <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00399-9>
29. Yadav A.S., Sanjay Sinha. Solar-Wind Based Hybrid Energy System: Modeling and Simulation, *4th International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE)*, 2021, pp. 586-570. DOI: 10.1109/RDCAPE52977.2021.9633590

Статья поступила в редакцию 09.03.2023

Одобрена после рецензирования 14.03.2023

Принята к публикации 27.04.2023

The article was submitted on 09.03.2023; approved after reviewing on 14.03.2023; accepted for publication on 27.04.2023