

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.1(031)

АВТОНОМНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ И УМНОЙ СЕТЬЮ

Л.М. Четошникова¹, Н.И. Смоленцев¹, С.А. Четошников², Г.В. Гусаров²

¹Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, Россия

²Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

ORCID: orcid.org/0000-0001-6483-4053, chlm56@mail.ru

Резюме: Использование в системах электроснабжения современных устройств и технологий позволит обеспечить потребителей качественной энергией. Особенно эффективно в этом направлении будет построение автономных систем с использованием возобновляемых источников энергии и локальных интеллектуальных сетей. Решить вопросы согласованности работы всех элементов систем и оптимального управления энергопотоками позволят методы математического моделирования.

Ключевые слова: автономная система электроснабжения, возобновляемые источники энергии, интеллектуальная сеть, оптимальное управление, математическая модель.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-3-10

AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS WITH RENEWABLE SOURCES OF ENERGY AND SMART GRID

L.M. Chetoshnikova¹, N.I. Smolentsev¹, S.A. Chetoshnikov²,
G.V. Gusarov²

¹Branch of State Educational Institution South Ural State University, Miass, Russia

²State Educational Institution South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

ORCID: orcid.org/0000-0001-6483-4053, chlm56@mail.ru

Abstract: The use of modern devices and technologies in power supply systems will provide consumers with high-quality energy. Especially effective in this direction will be the construction of autonomous systems using renewable energy sources and local smart grids. The coordinated work of all elements of systems and optimal control of energy flows is solved by mathematical modeling methods.

Keywords: autonomous power supply system, renewable energy sources, smart grid, optimal control, mathematical model.

В последние годы в отечественной электроэнергетике произошли изменения, заставляющие пересматривать требования как к инфраструктуре, так и объектам электроэнергетики. Среди прочих чаще всего указывается на увеличивающийся износ основных

средств, что требует привлечения новых инвестиций на замещение выбывающих мощностей и строительство новых. При этом без изменения существующей структуры мощностей и практики их использования новые инвестиции неизбежно приведут к росту цены на энергию для потребителей. Современные технологии и устройства, такие как микрогенерация, автономные источники и накопители энергии, средства регулирования нагрузки, оперативное интеллектуальное управление и др., формируют новые модели поведения потребителей и требования к доступности, надежности и качеству электрической энергии.

Актуальность обеспечения все возрастающего спроса на качественную электроэнергию и снижения нагрузки на окружающую среду привели к необходимости создания новой инфраструктуры на принципах интеграции в сеть распределенной генерации, накопителей, микросетей, создания виртуальных электрических станций для снижения пика резерва мощности в системе. Предпринимаются попытки использования умной сети в системе электроснабжения потребителей. В настоящее время мероприятия по поддержанию соответствия предложения растущему спросу на энергию могут быть не только затратными, но и неэффективными при длительной эксплуатации. Поэтому цель умной сети – это не только соответствие предложения спросу, но и наоборот, приведение в соответствие спроса имеющемуся предложению с использованием современных технологий и заинтересованности потребителей через оптимальное ценообразование [1].

Для обеспечения повышенного спроса на электроэнергию энергоснабжающие компании отслеживают его и задействуют мощность дополнительных ресурсов, например, пиковых электростанций. При этом вовлечение дополнительных ресурсов генерации энергии требует больших капитальных вложений и оперативного расширения части компаний. Если для производства энергии применяют традиционные источники, то они еще могут оказывать неблагоприятное воздействие на окружающую среду.

Доля этих источников может быть сокращена путем выравнивания графика потребления электрической энергии. Теоретически добиться усреднения спроса можно за счет мотивации частных потребителей регулировать спрос на электроэнергию с последующим их поощрением. В этом состоит ключевая идея поддержания умной сети: стимулировать потребителей снижать или увеличивать энергопотребление в соответствии с предложением в то или иное время суток. Реализация данной идеи возможна путем разработки системы ценообразования, а также доступности энергии от собственных ветровых или солнечных электростанций. Это не только улучшит оперативную эффективность энергоснабжающих компаний, но также поможет избежать капитального инвестирования для генерирования дополнительной энергии, снизить зависимость от углеводородного топлива, что в итоге приведет к сокращению отрицательного влияния на окружающую среду.

Применяемая в настоящее время сеть состоит из следующих главных элементов (рис. 1): генерационной системы, системы распределения электроэнергии (шины распределительных подстанций), системы передачи (воздушные и кабельные линии) и потребителей. Генерационная система может состоять из совокупности разных источников.

Интеллектуальная сеть дает разнообразные возможности каждому потребителю через оптимальное управление электропитанием уравновесить энергию в системе, связанной с собственными источниками энергии, нагрузкой (потреблением) и хранением с использованием энергоемких батарей.

На рис. 2 показана модель системы с локальными источниками и потребителями, объединенными через микросеть. В такой системе сведения об уровне потребления энергии отдельными нагрузками и о выработке электроэнергии распределенными генераторами (РГ) передаются в управляющий центр, осуществляющий оптимальное регулирование и распределение мощности между потребителями.

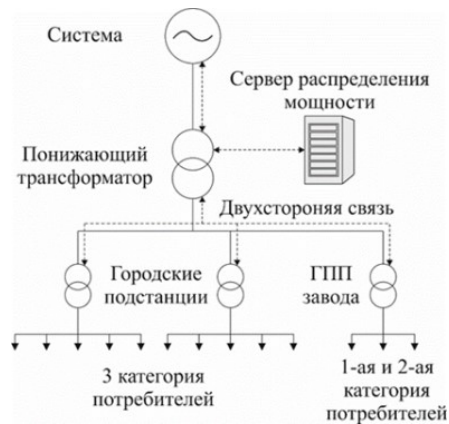


Рис. 1. Элементы электрической сети

Система генерации для питания потребителей представляет собой несколько альтернативных источников. Чаще всего это ветроэнергетическая установка (ВЭУ), солнечные батареи (СБ), а также дизель- или бензогенераторная установка.

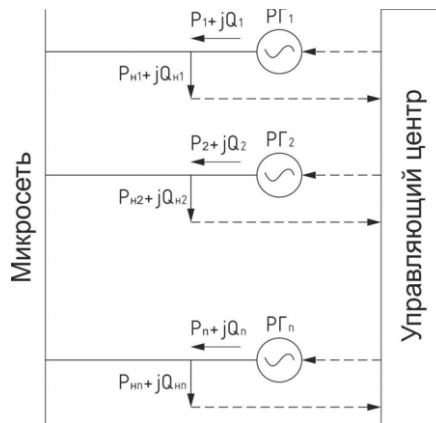


Рис. 2. Модель системы с локальными источниками и потребителями

При избытке вырабатываемой мощности указанные источники обеспечивают питанием балластную нагрузку, а также зарядку аккумуляторных батарей (АБ). При отсутствии ветра и солнца в работу будут введены аккумуляторные батареи, чтобы работать на полную нагрузку. Сложность состоит в том, что при использовании возобновляемых источников энергии выработка ими электроэнергии носит случайный характер, зависящий от климатических факторов, погодных условий в данной местности, времени года, суток и др. [2]. Индивидуальные потребители также имеют неравномерный суточный график потребления. Возможность разнести во времени производство и потребление электроэнергии путем ее накопления в больших масштабах – один из наиболее эффективных путей решения проблемы покрытия пиков потребления. В связи с этим требуется наличие емких накопителей энергии и средств контроля за вырабатываемой и потребляемой мощностями.

Для примера на рис. 3–5 [3] представлены графики вырабатываемой энергии ВЭУ, солнечной батареей и график потребления электроэнергии нагрузкой. Для согласования режимов работы элементов микросети необходимо разработать математическую модель.

Генерация электроэнергии от солнечных батарей смоделирована как источник энергии, чей выход может контролироваться. Максимальный выход энергии зависит от времени. При расчете могут быть использованы значения солнечной радиации, измеренной на ближайшей метеостанции. Графики, характеризующие поступление солнечной энергии в течение трех дней, показаны на рис. 3.

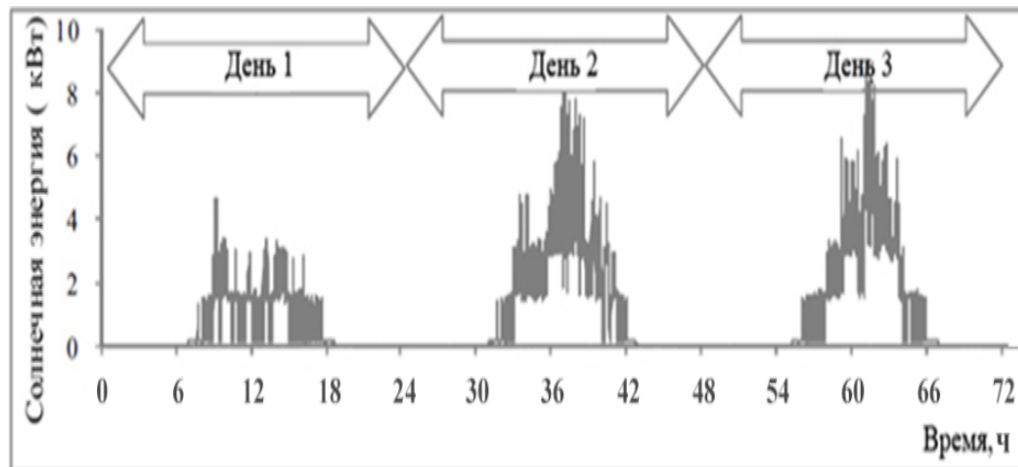


Рис. 3. Поступление солнечной энергии

Выработка энергии ветроустановками в течение трех дней показана на рис. 4. График построен на основании измерений скорости ветра, которые соответствуют данной местности. Выход энергии ветра регулируется изменением угла атаки относительно лопастей ветряка. Также предполагается, что соотношение между углом атаки, скоростью ветра и выходом энергии ветрогенератора известны.

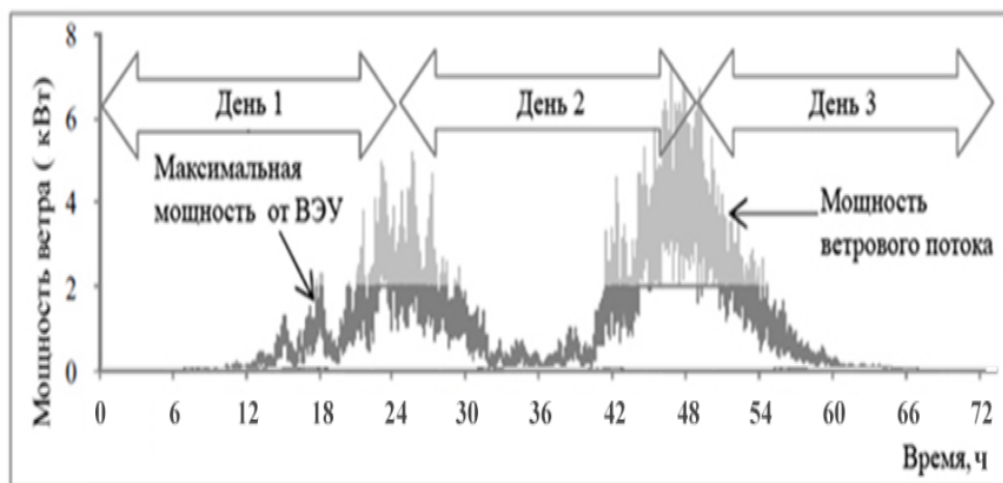


Рис. 4. График выработки энергии ветроустановкой

Разнообразие неконтролируемых нагрузок за период трех дней показано на рис. 5. Выбранный для изучения график соответствует нагрузке потребителей для трех произвольных дней. Предполагается также, что в нагрузку включена зарядка аккумуляторов.

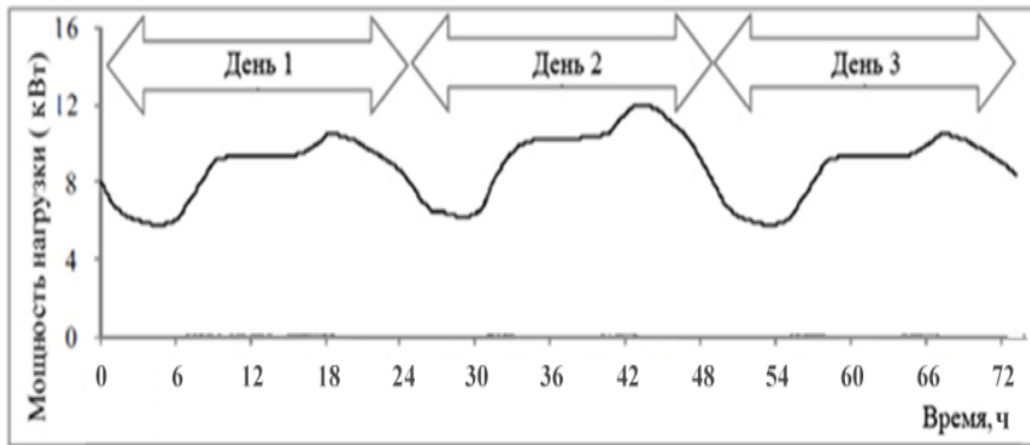


Рис. 5. График потребления нагрузки

Аккумуляторные батареи вносят значительный вклад в процесс регулирования и контроля энергии. Для того, чтобы обеспечить удобство для пользователя, аккумулятор заряжается до 90% от максимального уровня. Процесс зарядки и разрядки аккумуляторов для трех дней показан на рис. 6.

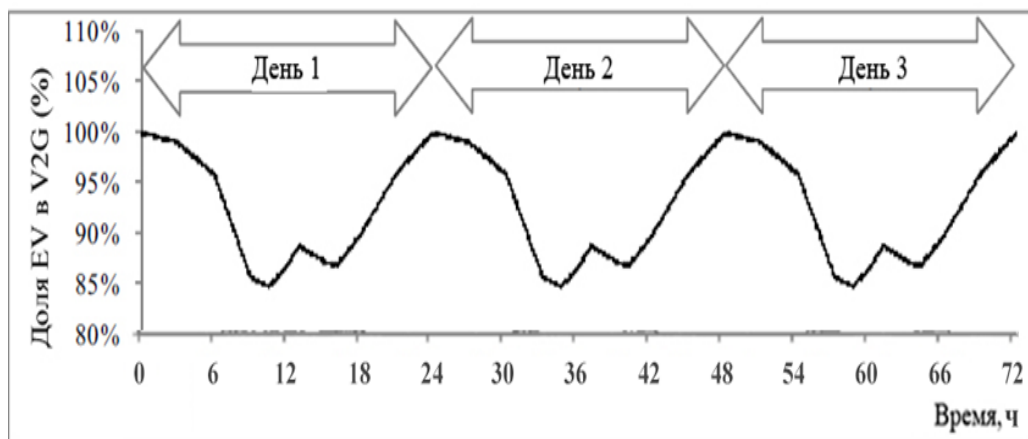


Рис. 6. Процесс зарядки-разрядки аккумуляторов

Для решения задачи оптимального управления вводятся характерные параметры, которые следует контролировать в процессе работы (X_i). С точки зрения наибольшей информативности для определения состояния автономной сети используют следующие параметры: $P_{ВЭУ}$ – мощность, вырабатываемая ВЭУ; P_H – мощность нагрузки автономной сети; U_B – напряжение на АБ; Q_B – величина заряда батарей; $P_{СБ}$ – мощность, вырабатываемая солнечными панелями. Эти параметры являются входными переменными для модели системы.

Кроме того, необходимо учесть возмущающие воздействия Z_i , которые не поддаются контролю, следовательно являются случайными или меняющимися во времени (скорость ветра, инсоляция, температура воздуха и др.). Наличие таких случайных возмущений усложняет задачу оптимального управления и требует статистических методов для определения динамических характеристик системы [4].

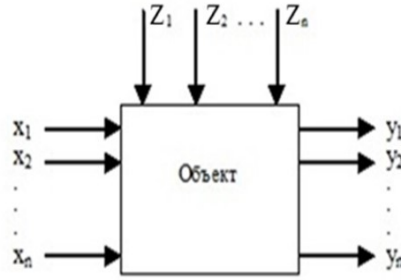


Рис. 7. Структурная схема объекта исследования

Для оценки влияния внешних климатических факторов обычно применяют методы описательной статистики, которые используют комбинацию двух основных подходов: 1) усреднение в пределах длительных интервалов времени (например, среднемесячные и среднегодовые значения); 2) использование статистических распределений, параметры которых также получены усреднением по времени, например, описание ветровых режимов распределением Вейбулла.

Ветрогенератор в модели, как электрическая машина на постоянных магнитах, описывается системой уравнений, заданной в осях q и d [5]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d - \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_q, \\ \frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d - \frac{\lambda p \omega_r}{L_q}, \\ T_e = 1,5 p \left[\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right], \\ \frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (T_e - F \omega_r - T_m), \\ \frac{d}{dt} \theta = \omega_r, \end{cases} \quad (1)$$

где L_q, L_d – индуктивности статора по осям q и d ; R – сопротивление обмотки статора; i_q, i_d – проекции тока статора на оси q и d ; U_q, U_d – проекции напряжения статора на оси q и d ; ω_r – угловая частота вращения ротора; λ – магнитный поток постоянных магнитов; p – число пар полюсов; T_e – электромагнитный момент; J – суммарный момент инерции ротора и нагрузки; F – коэффициент трения; θ – угол ротора; T_m – момент сопротивления.

Значение средней производительности ВЭУ с номинальной мощностью $P_{ВЭУ}$, начальной скоростью ветроколеса v_0 , номинальной скоростью $v_{ном}$ и предельной скоростью $v_{макс}$ определяется по формуле

$$\bar{A} = \frac{\bar{v}_p^3}{v_{ном}^3} \cdot P_e \cdot T, \quad (2)$$

где $\bar{v}_p^3 = \bar{v}_n^3 \left[I(x_{\text{ном}}, m) - I(x_0, m) + I(x', m) \right]$ – средний куб скорости в диапазоне рабочих скоростей ($v_{\text{макс}} > v \geq v_0$); $I(x, m) = \frac{1}{\Gamma(m)} \int_0^x e^{-t} t^{m-1} dt$ – неполная гамма-функция; $x = \left(\frac{v}{\beta} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$; $m = \frac{3}{\gamma} + 1$; β, γ – параметры функции Вейбулла; $\Gamma(m)$ – полная гамма-функция.

Вычислить значения неполной гамма-функции $I(x_{\text{ном}}, m)$, $I(x_0, m)$ и $I(x', m)$ можно, воспользовавшись справочными таблицами либо специализированными программами через разложение в ряд, либо выражение через непрерывные дроби (в зависимости от значений аргументов) [6].

Модель ветроустановки на постоянных магнитах получает входной сигнал механического момента от ветроколеса. Выводы фаз подключаются к нагрузке. В данной модели роль нагрузки исполняет активная трехфазная нагрузка. В дальнейшем трехфазный ток будет выпрямлен для возможности передачи мощности на шину постоянного тока.

Для расчета тока и напряжения на выходе солнечной батареи воспользуемся формулами:

$$I_d = I_0 \left[e^{\frac{U_d}{U_T}} - 1 \right]; \quad (3)$$

$$U_T = \frac{kT}{q} \times nl \times N_{\text{cell}}, \quad (4)$$

где I_d – ток диода (А); U_d – напряжение диода (В); I_0 – ток насыщения (А); k – постоянная Больцмана ($1,3806 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹); q – заряд электрона ($1,6022 \cdot 10^{-19}$ Кл); T – температура элемента (К); N_{cell} – число элементов в модуле [7].

Мощность солнечной батареи РСБ определяется произведением тока на напряжение:

$$P_{\text{СБ}} = I_d U_T. \quad (5)$$

Модель комбинированной установки, включающей в себя локальные источники энергии и нагрузку, показана на рис. 8. Математическая модель реализована с использованием программного обеспечения из пакета *MATLAB-Simulink* [8]. Модель позволяет оценить влияние входных и возмущающих воздействий на ток и напряжение на выходе системы.

В данной модели энергия, поступающая от ВЭУ и солнечных батарей, накапливается в аккумуляторной батарее, выполняющей роль нагрузки. Для моделирования батареи используется стандартный блок “*Battery*” из библиотеки *Simulink* с напряжением 48 В и емкостью 100 А·ч. Зарядка производится через простейший контроллер, отключающий батарею от сети при полной зарядке. В качестве выпрямителя используется диодный мост с LC-фильтром [9–11].

Использование в исследованиях метода математического и компьютерного моделирования позволяет заменить реальную систему автономного электроснабжения упрощенной копией и, тем самым, предсказать характер и ход изменения выходных параметров при изменении входных и возмущающих факторов. Этот метод наиболее эффективен, когда входные параметры носят случайный характер и для описания процессов используются вероятностно-статистические модели.

Результаты комплексных исследований при различном сочетании возмущающих факторов могут быть использованы при проектировании и эксплуатации автономных систем электроснабжения и определении наилучшего (наиболее оптимального) решения из множества допустимых решений.

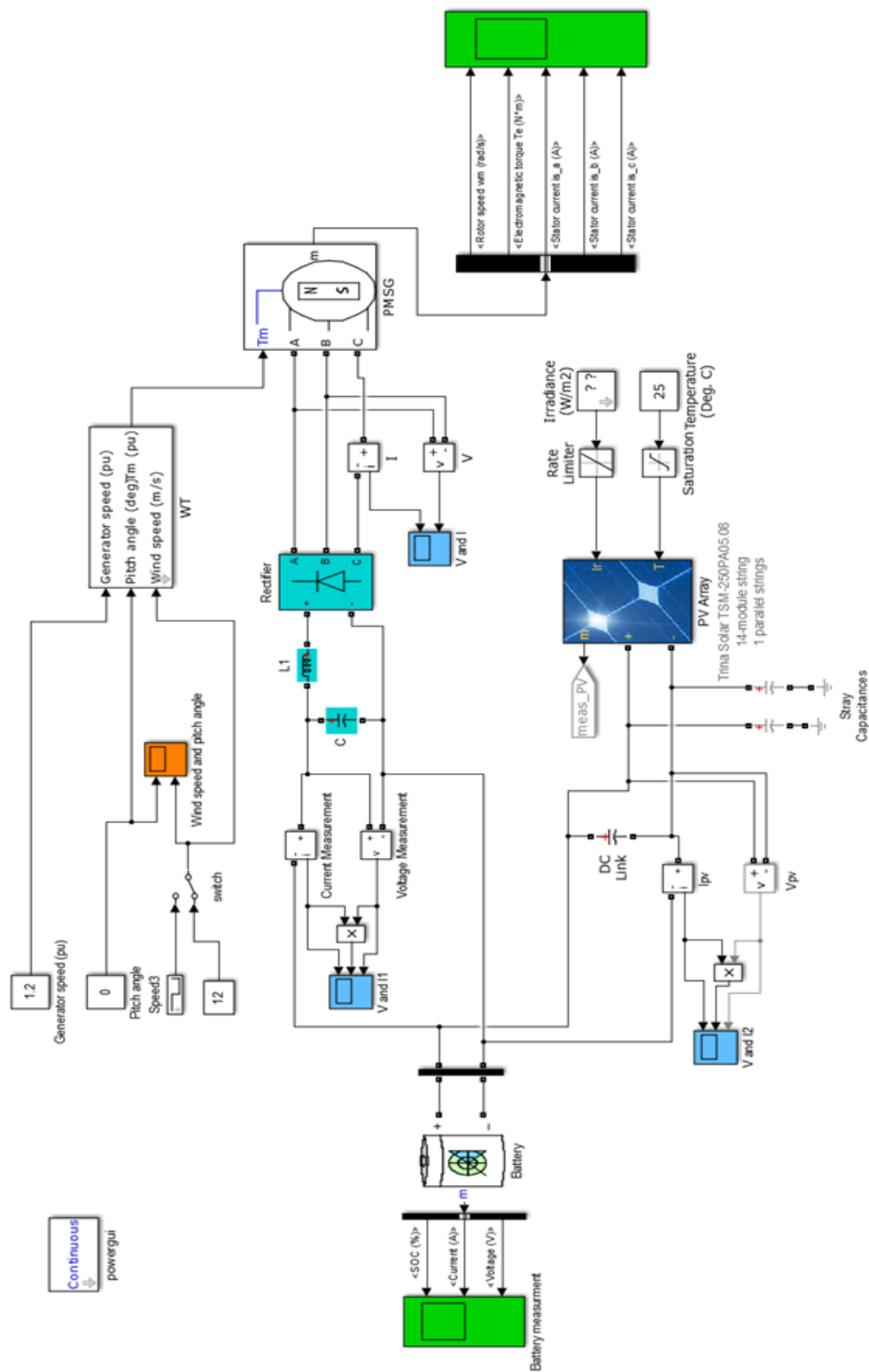


Рис. 8. Модель комбинированной ветро-солнечной установки

Литература

1. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SmartGrid. М.: ИАЦ Энергия. 2010. 208 с.
2. Щеклеин С.Е., Власов В.В. Моделирование нестационарных случайных процессов в задачах обоснования возобновляемых источников энергии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2012. № 03 (107). С. 67–71.
3. Liyanage K.M., Yokoyama A., Ota Y., Nakajima T., Taniguchi H. Impacts of Communication Delay on the Performance of a Control Scheme to Minimize Power Fluctuations Introduced by Renewable Generation under Varying V2G Vehicle Pool Size // 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications, Gaithersburg, Maryland, USA, 2010. С. 85–90.
4. Велькин В.И., Логинов М.И. Выбор оптимального состава оборудования в кластере возобновляемых источников энергии на основе регрессионного анализа // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2012. № 03 (107). С. 100–104.
5. Гапоненко А.М., Каграманова А.А. Методика и алгоритм математического анализа многофакторной модели оптимальной конфигурации нетрадиционных возобновляемых источников энергии // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. Вып. № 4 (46), ч. 2. С. 76–79.
6. Концепция использования ветровой энергии в России / Под ред. П.П. Безруких. М.: «Книга-Пента», 2005. 128 с.
7. Колосов Р.В., Пученкин А.В., Титов В.В., Титов В.Г. Возобновляемые источники энергии в системах малой генерации // Актуальные проблемы электроэнергетики. Материалы научно-технической конференции. Н. Новгород, 2013. С. 207–211.
8. Hui J., Bakhshai A., Jain P.K. A hybrid wind-solar energy system: A new rectifier stage topology // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE. IEEE, 2010. С. 155–161.
9. Fesli U., Bayir R., Özer M. Design and implementation of a domestic solar-wind hybrid energy system // Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009. International Conference on. IEEE, 2009. С. I–29–I–33.
10. Werner Kleinkauf, Gunther Cramer, Mohamed Ibrahim. PV System Technology. State of the Art Developments and Trends in Remote Electrification. SMA Catalogue, 2007–2008.
11. Кирпичникова И.М., Четошников С.А. Моделирование комбинированной ветро-солнечной установки // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2016. № 7–8 (195–196). С. 25–31.

Авторы публикации

Четошникова Лариса Михайловна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Автоматика» филиала Южно-Уральского государственного университета в г. Миассе.

Смоленцев Николай Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматика» филиала Южно-Уральского государственного университета в г. Миассе.

Четошников Сергей Александрович – аспирант Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск.

Гусаров Глеб Вадимович – аспирант Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск.

References

1. Kobets B.B., Volkova I.O. Innovatsionnoe razvitie elektroenergetiki na baze kontseptsii SmartGrid. M.: IATS Energiya. 2010. 208 p.
2. Scheklein S.E., Vlasov V.V. Modelirovanie nestatsionarnykh sluchaynykh protsessov v zadachakh

obosnovaniya vozobnovlyаемых istochnikov energii // Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Al'ternativnaya energetika i ekologiya». No. 03 (107). 2012. P. 67–71.

3. Liyanage K.M., Yokoyama A., Ota Y., Nakajima T., Taniguchi H. Impacts of Communication Delay on the Performance of a Control Scheme to Minimize Power Fluctuations Introduced by Renewable Generation under Varying V2G Vehicle Pool Size. 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications, Gaithersburg, Maryland, USA, 2010. P. 85–90.

4. Vel'kin V.I., Loginov M.I. Vybór optimal'nogo sostava oborudovaniya v klastere vozobnovlyаемых istochnikov energii na osnove regressionnogo analiza. Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Al'ternativnaya energetika i ekologiya». No. 03 (107). 2012. P. 100–104.

5. Gaponenko A.M., Kagramanova A.A. Metodika i algoritm matematicheskogo analiza mnogofaktornoy modeli optimal'noy konfiguratsii netraditsionnykh vozobnovlyаемых istochnikov energii // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. Iss. No. 4 (46), ch. 2. 2016. P. 76–79.

6. Kontseptsiya ispol'zovaniya vetrovoy energii v Rossii. /Pod red. P.P. Bezrukh. M.: «Kniga-Penta», 2005. 128 p.

7. Kolosov R.V., Puchenkin A.V., Titov V.V., Titov V.G. Vozobnovlyаемые istochniki energii v sistemakh maloy generatsii. Aktual'nye problemy elektroenergetiki. Materialy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. N. Novgorod, 2013. P. 207–211.

8. Hui J., Bakhshai A., Jain P.K. A hybrid wind-solar energy system: A new rectifier stage topology. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE. IEEE, 2010. P. 155–161.

9. Fesli U., Bayir R., Özer M. Design and implementation of a domestic solar-wind hybrid energy system. Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009. International Conference on. IEEE, 2009. P. 1–29–1–33.

10. Werner Kleinkauf, Gunther Cramer, Mohamed Ibrahim. PV System Technology. State of the Art Developments and Trends in Remote Electrification. SMA Catalogue, 2007–2008.

11. Kirpichnikova I.M., Chetoshnikov S.A. Modelirovanie kombinirovannoy vetro-solnechnoy ustanovki. Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Al'ternativnaya energetika i ekologiya». No. 7–8 (195–196). 2016. P. 25–31.

Authors of the publication

Larisa M. Chetoshnikova - Ph.D., Professor, Branch of State Educational Institution South Ural State University, Miass, Chelyabinsk Region, Russia.

Nikolay I. Smolentsev - Ph.D., Associate Professor, Branch of State Educational Institution South Ural State University, Miass, Chelyabinsk Region, Russia.

Sergey A. Chetoshnikov – postgraduate, State Educational Institution South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Gleb V. Gusarov – postgraduate, State Educational Institution South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Поступила в редакцию

03 мая 2017 г.