

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

С.В. Бутаков, А.С. Червочков

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
г. Архангельск, Россия*

Фотоэлектрические модули в составе гибридных энергоустановок находят все большее применение для электроснабжения изолированных потребителей, например, расположенных в Арктической зоне. Выбор режимов работы и настроек систем управления для обеспечения эффективной эксплуатации солнечной электростанции является востребованным и требует проведения комплексных исследований в климатических условиях Арктической зоны. В работе приведены результаты экспериментальных исследований по эффективности режимов работы солнечной электростанции в городе Архангельске. Проанализированы автономный режим работы, режим принудительной генерации и режим подкачки. Предложены рекомендации по использованию этих режимов с эффективными параметрами настроек.

Ключевые слова: солнечная электростанция, Арктическая зона, фотоэлектрический модуль, контроллер, генерация, электрическая сеть.

Введение

В мире широко используются фотоэлектрические модули (ФМ) в составе солнечных электростанций (СЭС) для электроснабжения изолированных потребителей, не имеющих возможность получать электроэнергию от централизованной энергосистемы. По структуре различают автономные фотоэлектрические системы и гибридные энергетические комплексы; в последних используются несколько генерирующих источников, что повышает надежность электроснабжения потребителей при пасмурной погоде или ночью [1]. Использование гибридных энергетических комплексов особенно актуально для условий Крайнего Севера в зимнее время, когда длительность солнечного дня наименьшая. Гибридные энергосистемы могут различаться в зависимости от используемых источников энергии (фотоэлектрические модули, ветроэнергетические установки, дизельные генераторы, бензиновые генераторы, сеть промышленной частоты и др.), режимов работы электростанции [2]. Установка эффективных режимов работы СЭС совместно с другими генерирующими источниками на практике зависит от многих факторов, в первую очередь – от режима работы потребителей в течение суток, солнечной радиации в течение дня, которая зависит от облачности, времени дня и года. Поскольку солнечная радиация имеет стохастическую природу, для определения выработки электроэнергии солнечными панелями на будущие периоды времени можно использовать прогнозы разной степени точности и математическое моделирование. Нахождение оптимального соотношения между генерируемой фотоэлектрическими панелями мощностью, мощностью нагрузки и мощностью других источников в энергосистеме в течение суток является главной задачей для эффективной эксплуатации СЭС [3, 4]. Также

на выработку электроэнергии фотоэлектрическими модулями влияет температура окружающего воздуха, которая в свою очередь определяет температуру поверхности ФМ, от которой практически линейно зависит величина напряжения холостого хода ФМ [5, 6]. Напряжение холостого хода солнечной панели увеличивается примерно на 20–25 % при понижении температуры от +25 до –30 °С. Поэтому в условиях Арктической зоны зимой при низких температурах эффективность работы СЭС будет выше, чем в летнее время [7].

Применение СЭС в виде гибридной энергосистемы в условиях Арктической зоны имеет свои особенности, например, неравномерная солнечная радиация в течение суток в зависимости от времени года, низкие температуры окружающего воздуха в зимнее время, вероятность образования наледи на солнечных панелях. Для использования по максимуму энергии от фотоэлектрических модулей необходимо определить эффективные режимы работы СЭС и параметры систем управления. Задачей данной работы являлось экспериментальное исследование эффективности режимов работы фотоэлектрических модулей в городе Архангельске в летнее время. Данное исследование является актуальным, поскольку эффективная работа СЭС и использование максимальной мощности ФМ возможны только при определенных настройках параметров режима и систем управления электростанции в конкретных климатических условиях.

Основное содержание

Экспериментальное исследование режимов работы фотоэлектрических модулей в условиях Арктической зоны Российской Федерации проводилось в г. Архангельске (64°32' с. ш. и 40°31' в. д.) в летнее время (июнь, июль). Солнечная электростанция установленной мощностью 1200 Вт рас-

Альтернативные источники энергии

полагается в Учебно-научном центре энергетических инноваций (УНЦЭИ) Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Установка состоит из 6 поликристаллических панелей с номинальной мощностью 200 Вт каждая, которые установлены на южной стене здания УНЦЭИ под углом 70° , азимут – на юг, 0° . Было проведено исследование трех режимов работы солнечной электростанции: режим принудительной генерации ЭКО, режим подкачки ЭКО, автономный режим работы СЭС (без внешней сети). В дни проведения исследования была преимущественно ясная солнечная погода. Исследование проводилось в течение рабочего дня с подключением нагрузки к СЭС по установленному графику.

В режиме принудительной генерации в зависимости от напряжения на аккумуляторной батарее (АКБ) многофункциональный автономный преобразователь (МАП) может переключить нагрузку с внешнего источника (например, сеть) на АКБ или наоборот, позволяя использовать энергию солнца по максимуму (для заряда АКБ и обеспечения электроэнергией потребителей). В режиме подкачки ЭКО осуществляется добавление в сеть («подкачка») определенной мощности от АКБ в зависимости от напряжения на АКБ и процента подкачки, при этом внешняя сеть всегда подключена к нагрузке.

Солнечная электростанция состоит из следующих основных элементов (рис. 1): 6 солнечных фотоэлектрических модуля Exmork ФСМ-200П 200 Вт 24 В Поли, соединенных последовательно-параллельно (2 параллельные цепи по 3 последовательно соединенных модуля в каждой); солнечный контроллер КЭС с функцией отслеживания точки максимальной мощности (MPPT-контроллер) с преобразователем DC/DC MPPT (C)mART; накопитель энергии на базе восьми гелевых аккумуляторных батарей серии GST 12-100 SOLAR; инвертор МАП HYBRID производства ООО «МикроАРТ»; программно-аппаратный комплекс

«Малина-2» на базе микрокомпьютера и персонального компьютера; потребитель электроэнергии, включающий освещение в лаборатории на основе светодиодных светильников и лабораторные стенды по возобновляемым источникам энергии (модель солнечной электростанции, модель ветроэнергетической установки, стенды с тепловыми насосами).

Гелевые АКБ имеют номинальное напряжение 12 В, номинальную емкость 100 А·ч. Аккумуляторная батарея состоит из 8 аккумуляторов, которые соединены в 4 параллельные цепи, в каждой из которых по 2 последовательно соединенных аккумулятора. Таким образом, напряжение АКБ 24 В, емкость 400 А·ч. Емкость АКБ была выбрана из расчета обеспечения энергией нагрузки 1 кВт в течение дня.

Инвертор МАП HYBRID является многофункциональным автономным преобразователем напряжения. Он может использоваться в качестве источника бесперебойного питания, универсального зарядного устройства и сетевого инвертора, оптимизирующего использование альтернативных источников энергии. Технические характеристики инвертора: максимальная мощность 6000 Вт, пиковая мощность (5 с) 9000 Вт, номинальная мощность 4000 Вт, рабочее напряжение 24 В, выходное напряжение 220 В 50 Гц. Инвертор связан физически кабелем с MPPT-контроллером и является ведущим.

Программно-аппаратный комплекс «Малина-2» на основе микрокомпьютера применяется для дистанционного мониторинга электросетей и управления инверторами, солнечными MPPT-контроллерами и аккумуляторами. Комплекс представляет собой автономный Web-сервер, построенный на базе микро-ПК с операционной системой Linux. Микро-ПК собирает необходимые данные с МАП и MPPT-контроллера, позволяет управлять режимными параметрами инвертора с персонального компьютера. С помощью данного программного обеспечения фиксировались основные данные

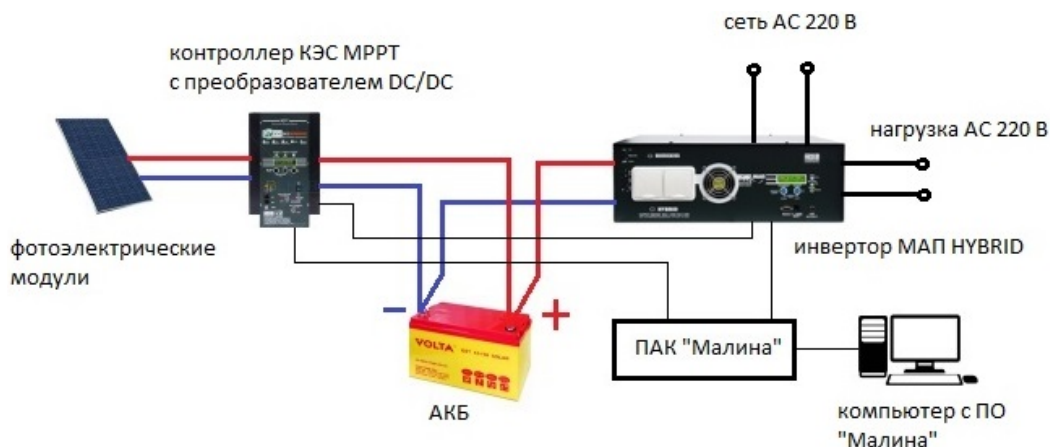


Рис. 1. Схема построения солнечной электростанции

о состоянии и режимах работы солнечной электростанции, в частности, мощность, вырабатываемая солнечными панелями, состояние заряда и напряжение аккумуляторных батарей, потребляемая мощность, сетевая мощность, вырабатываемая и потребляемая электроэнергия в течение дня.

При проведении исследования к солнечной электростанции подключались следующие потребители: светодиодное освещение в лаборатории в виде осветительной установки, состоящей из 16 светодиодных потолочных светильников СБ40П мощностью 40 Вт каждый (общая мощность осветительной установки 640 Вт), и циркуляционный насос станда теплового насоса марки ADB-40 мощностью 430 Вт. К МАП через счетчик подключена внешняя сеть. К выходу МАП через счет-

чик подключаются групповые линии осветительной сети и розеточной сети лабораторных стендов в щите ЩО2. Однолинейная схема электрической сети с подключением нагрузки к солнечной электростанции показана на рис. 2. Для обеспечения возможности отключения потребителей от солнечной электростанции с последующим переключением на сеть и обратно служит специальный автоматический выключатель. МАП и потребители подключаются на фазу В.

На первом этапе был установлен в МАП режим принудительной генерации ЭКО со следующими параметрами: максимальная мощность сети – 9000 Вт (150 % от максимальной мощности МАП); напряжение АКБ, меньше которого прекращается принудительная генерация от АКБ $U_{\min \text{ЭКО}} = 26 \text{ В}$;

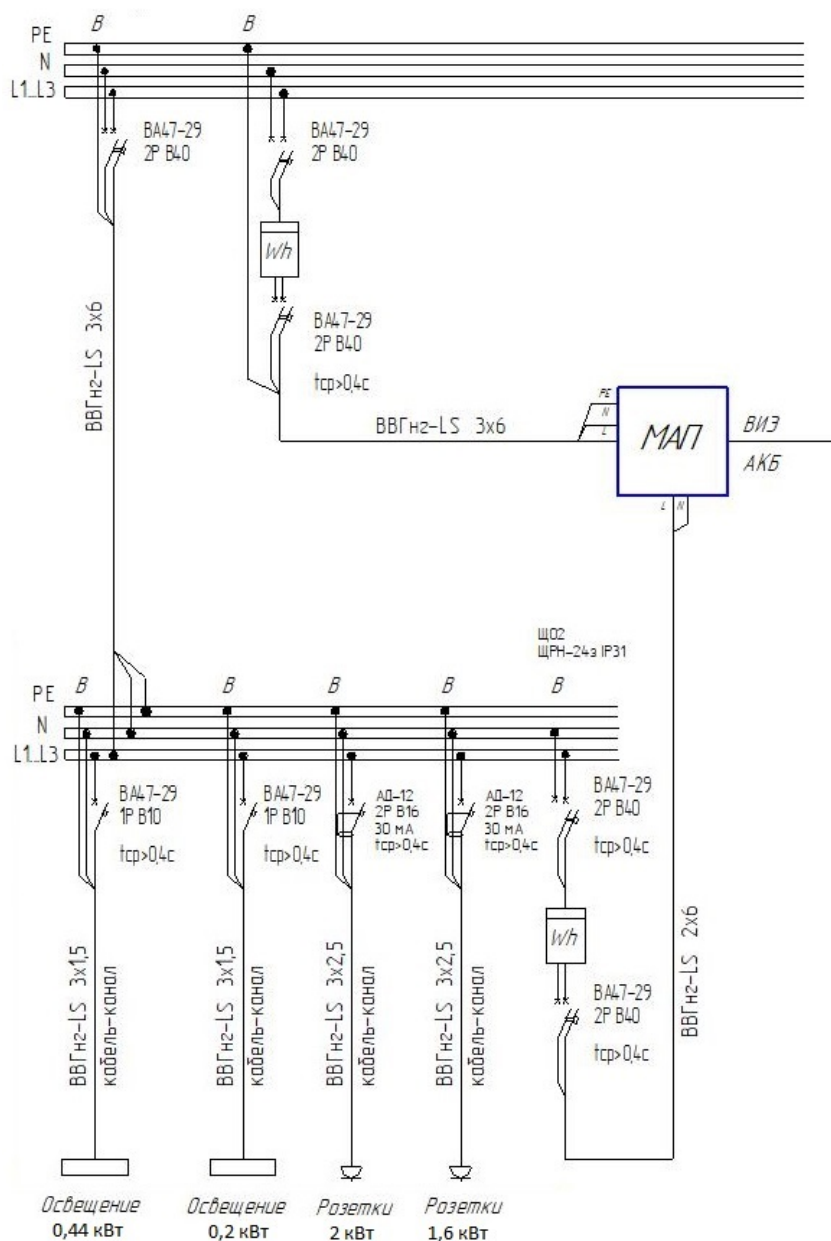


Рис. 2. Однолинейная схема электрической сети нагрузки СЭС

Альтернативные источники энергии

верхний допустимый порог сетевого напряжения – 265 В; нижний допустимый порог сетевого напряжения – 120 В. При напряжении ниже $U_{\min\text{ЭКО}}$ МАП будет транслировать сеть вплоть до полного заряда АКБ от солнечных панелей (СП). В ПАК «Малина-2» регистрировались следующие параметры режима работы СЭС: напряжение, ток и мощность сети, АКБ и солнечных панелей, ток от контроллера МРРТ. Вручную регистрировался уровень заряда АКБ с интервалом времени 10 мин. Также определялась энергия за день, полученная от солнечных панелей, от сети и от АКБ. Буферное напряжение, около которого рекомендуется поддерживать АКБ, – 27,2 В. На-

пряжение на АКБ, по достижении которого заканчивается заряд, – 28,4 В.

Как показывают результаты измерений и полученные графики (рис. 3), в утренние и вечерние часы при равномерной нагрузке (освещение в лаборатории) преобладала трансляция сети, а днем, когда солнечные панели генерировали максимальную мощность, преобладала генерация от АКБ. Максимальная мощность, вырабатываемая солнечными панелями, составила 980 Вт, максимальный ток СП – 13 А, в дневные часы при генерации от АКБ напряжение панелей составило около 90 В, максимальный ток МРРТ-контроллера составил около 35 А (при этом баланс токов по АКБ был +5 А,

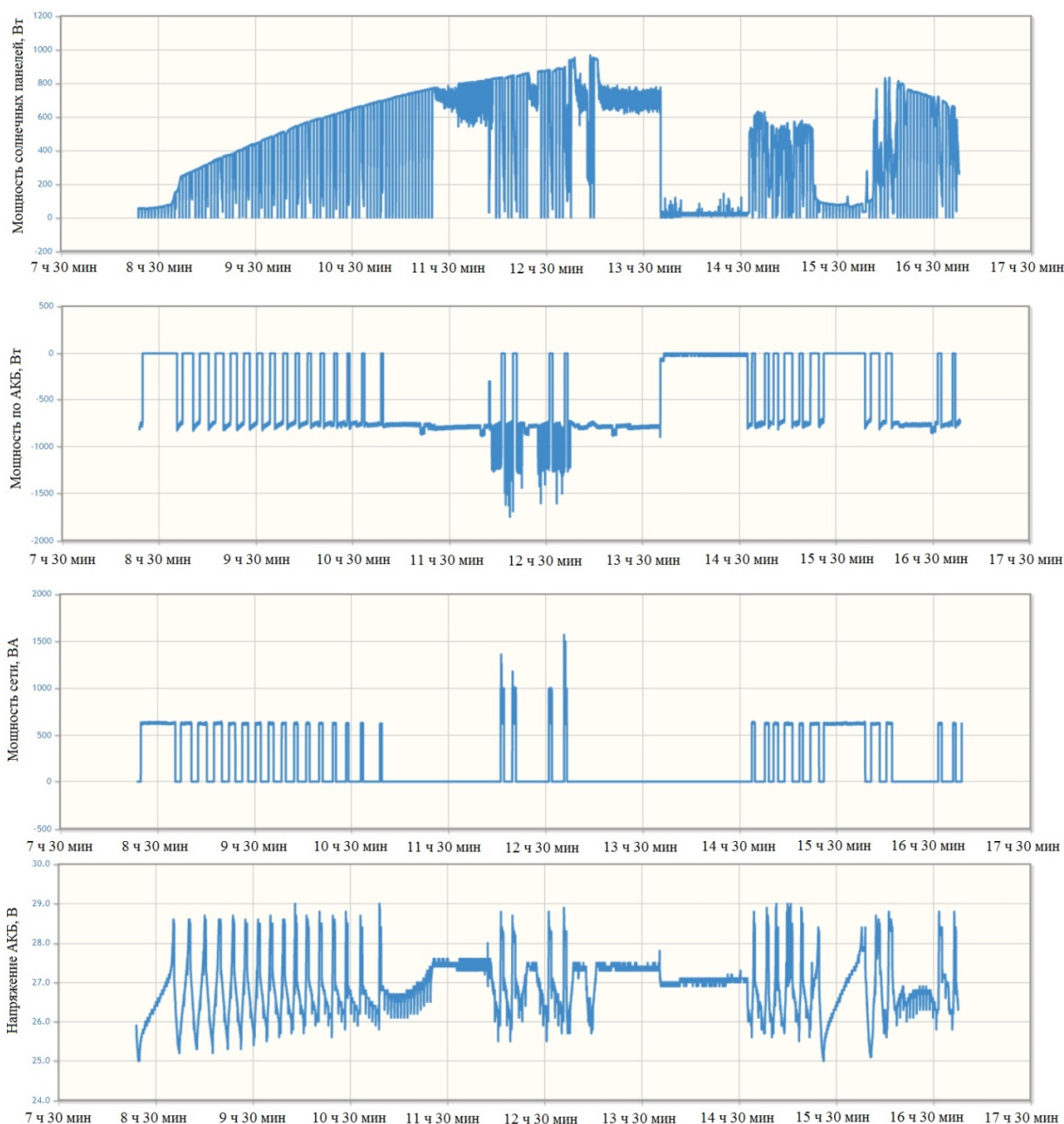


Рис. 3. Зависимости мощности солнечных панелей, мощности по АКБ, мощности сети и напряжения АКБ от времени (принудительная генерация)

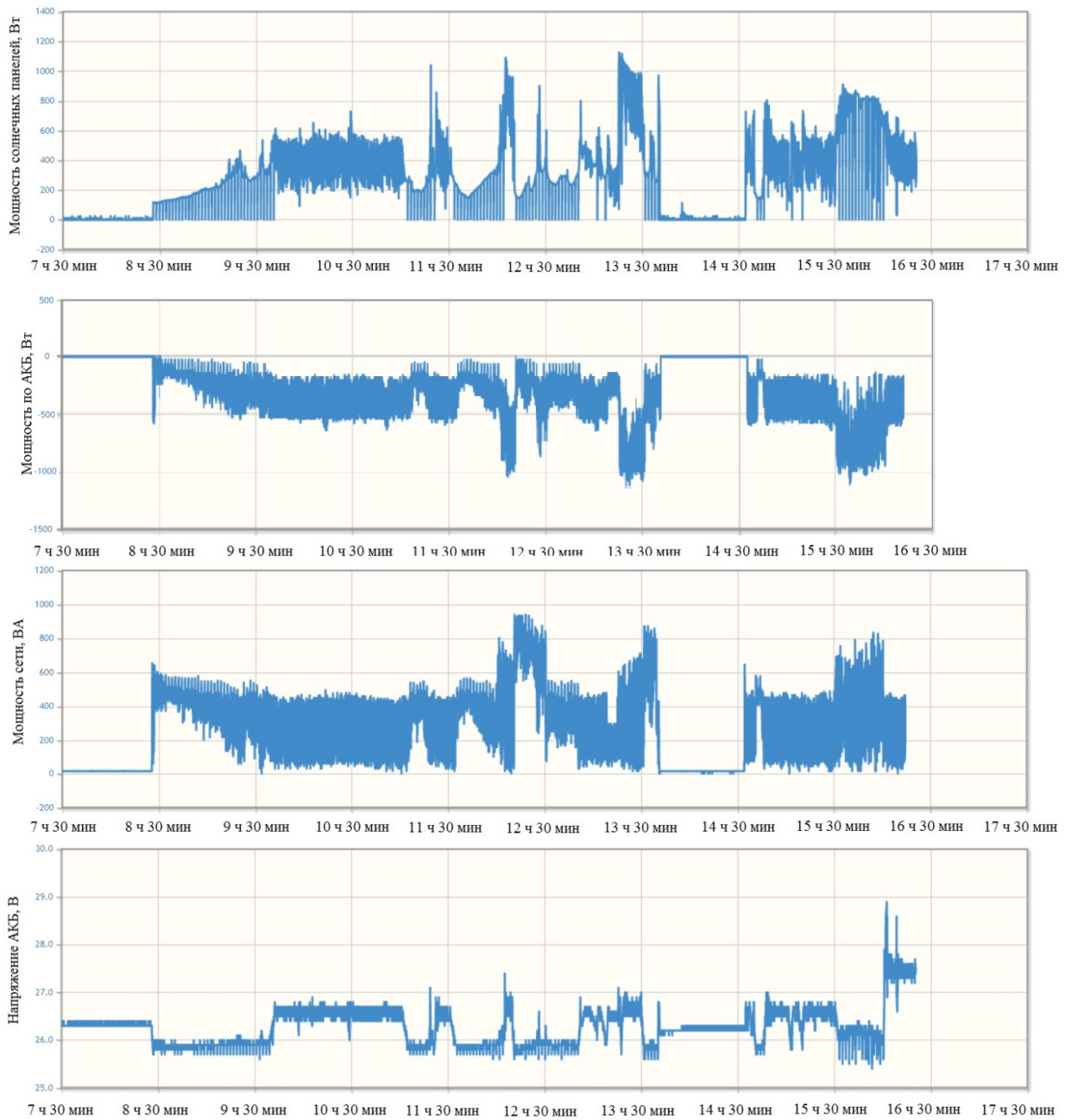


Рис. 4. Зависимости мощности солнечных панелей, мощности по АКБ, мощности сети и напряжения АКБ от времени (подкачка)

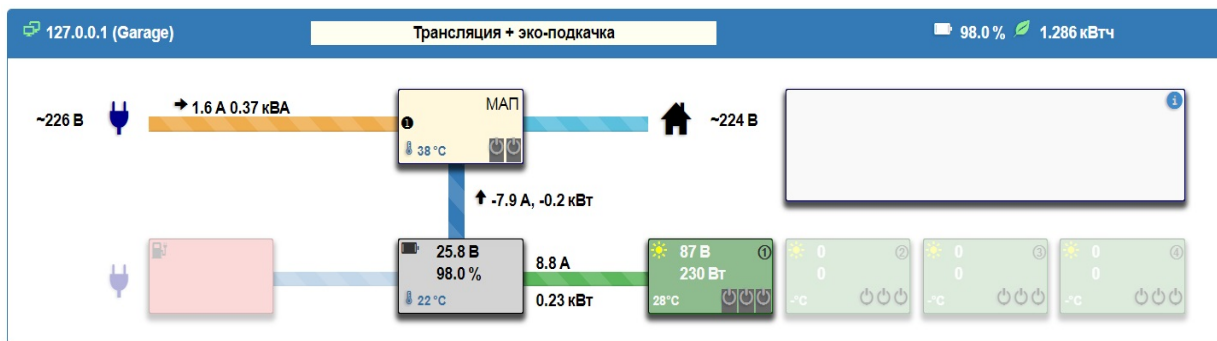


Рис. 5. Схема работы СЭС в режиме подкачки

Альтернативные источники энергии

т. е. происходил заряд АКБ от СП при работе в режиме генерации электроэнергии от АКБ). Максимальная мощность по АКБ наблюдалась в периоды включения теплового насоса и составила 1700 Вт (ток 65 А), при работе только осветительной нагрузки мощность составила около 750–800 Вт (ток 30 А). Напряжение АКБ при трансляции сети повышалось примерно от 25,5 до 28,4 В при заряде от СП, при генерации от АКБ напряжение уменьшалось примерно от 28,4 до 25,5 В. Видно, что в дневные часы напряжение АКБ при включенном освещении практически не меняется (нет разряда и заряда). Мощность сети также изменялась от 640 ВА (освещение) до 1500 ВА (освещение и тепловой насос), ток сети изменялся от 2,8 до 6,8 А. Напряжение на выходе МАП менялось от 220 В при генерации от АКБ до 233 В при трансляции сети. Колебания параметров СЭС в течение дня объясняются изменением нагрузки (включение стэнда теплового насоса), изменением солнечной радиации в течение дня, циклом заряда-разряда АКБ. Минимальный уровень заряда АКБ составил 93,1 %. Энергия, выработанная солнечными панелями в

течение дня (с 8:00 до 16:00), составила 3,268 кВт·ч. Энергия, полученная с АКБ, – 3,26 кВт·ч, энергия из сети – 1,27 кВт·ч.

На втором этапе был установлен в МАП режим подкачки ЭКО со следующими параметрами: максимальная мощность сети – 9000 Вт; напряжение АКБ, меньше которого прекращается подкачка (или ограничивается током заряда АКБ от СП), – $U_{\min\text{ЭКО}} = 26$ В; минимальная мощность подкачки при напряжении $U_{\min\text{ЭКО}} - 10\%$ от максимальной мощности МАП. В ПАК «Малина-2» регистрировались параметры режима работы СЭС, аналогичные режиму принудительной генерации. Заряд АКБ в начале эксперимента 98,6 %, в конце – снизился до 97,4 %.

Как показывают результаты измерений и полученные графики (рис. 4), в периоды включения теплового насоса мощность, подкачиваемая из АКБ, превосходила мощность сети за счет максимального использования энергии СП. Максимальная мощность, вырабатываемая солнечными панелями, составила 1120 Вт, максимальный ток СП – 14 А, напряжение панелей колебалось около 100 В,



Рис. 6. Зависимости мощности солнечных панелей, мощности по АКБ и напряжения АКБ от времени (автономная работа без сети)

максимальный ток МРРТ-контроллера составил около 41 А. Баланс токов по АКБ в среднем составлял 0 А, т. е. ток от МРРТ-контроллера был равен току разряда по батарее, при включении теплового насоса баланс составлял -7 А, происходил разряд АКБ. Максимальная мощность по АКБ при включении освещения и теплового насоса составила 1115 Вт (ток 41 А), при работе только осветительной нагрузки мощность составила около 500 Вт (ток 20 А). Напряжение АКБ в среднем составило 26,5 В, понижаясь при включении теплового насоса. Мощность сети также изменялась от 450 ВА (освещение) до 950 ВА (при включении теплового насоса), ток сети изменялся от 2 до 4 А. Колебания параметров СЭС в течение дня объясняются изменением нагрузки (периоды включения стенда теплового насоса), изменением солнечной радиации в течение дня. Энергия, выработанная солнечными панелями в течение дня, составила 2,403 кВт·ч. Энергия, полученная с АКБ, $-2,12$ кВт·ч, энергия из сети $-1,95$ кВт·ч. На рис. 5 показана схема работы СЭС с потоками мощности между структурными элементами (сеть, МАП, АКБ, СП) в режиме подкачки.

На третьем этапе был установлен автономный режим работы СЭС без сети, с генерацией от АКБ. В ПАК «Малина-2» регистрировались параметры режима работы СЭС: напряжение, ток и мощность АКБ и солнечных панелей, ток от контроллера МРРТ. Также определялись энергия за день от СП и АКБ. Заряд АКБ в начале эксперимента $-97,6\%$, минимум -86% . Наблюдался один цикл заряд/разряд за день.

Как показывают результаты измерений и полученные графики (рис. 6), для обеспечения электроэнергией потребителя достаточно мощности солнечных панелей и утреннего заряда АКБ (97,6%). Максимальная мощность, вырабатываемая солнечными панелями, составила 1200 Вт, что соответствует их пиковой мощности. Максимальный ток СП -15 А, напряжение панелей в среднем составило около 100 В, максимальный ток МРРТ-контроллера составил около 45 А. С 11:00 до 12:45 мощности СП хватало для обеспечения потребителя (освещение) и для заряда АКБ, при этом напряжение АКБ увеличилось от 25,3 до 28 В. С 12:45 до 13:40 был включен тепловой насос с освещением, поэтому АКБ разряжалась с 28 до 24,7 В. В обеденный перерыв нагрузка была отключена, АКБ заряжалась от 24,7 до 28,3 В (ток заряда по линии МРРТ-контроллера 20–10 А), далее после подключения освещения в 14:30 АКБ разряжалась до 25,5 В. Максимальная мощность по АКБ наблюдалась в период включения теплового насоса и составила 1200 Вт (ток 48 А), при работе только осветительной нагрузки мощность составила около 750 Вт (ток 30 А). Энергия, выработанная солнечными панелями в течение дня, составила 4,088 кВт·ч; энергия, полученная с АКБ, $-4,54$ кВт·ч.

Выводы

1. При работе солнечной электростанции в режиме принудительной генерации ЭКО происходят переключения с трансляции сети на генерацию от АКБ и обратно. Если параметры режима выставлены неэффективно, то возможны частые переключения с сети на генерацию и обратно, при этом снижается срок службы переключающего реле. Для эффективной работы СЭС в режиме принудительной генерации необходимо выставлять $U_{\min\text{ЭКО}}$ как можно ниже, чтобы по максимуму использовать энергию солнца, поскольку при переходе на трансляцию сети энергия СП используется только для заряда АКБ и ограничивается контроллером. Однако при низком $U_{\min\text{ЭКО}}$ интенсивнее расходуется ресурс АКБ. Поэтому данный режим эффективен, когда энергии солнца в течение дня хватает для поддержания напряжения на АКБ выше $U_{\min\text{ЭКО}}$. В условиях Арктической зоны это возможно летом, однако для Архангельска при малом среднем количестве солнечных дней в году (в среднем 76 солнечных дней в году, в июне 14 солнечных дней) солнечной энергии может не хватить для эффективной работы СЭС.

2. Режим подкачки мощности из АКБ является наиболее эффективным для Арктической зоны, поскольку при недостатке солнечной энергии, особенно зимой, позволит обеспечить надежность электроснабжения потребителей при экономии ресурса АКБ. Результаты исследования показали, что энергия солнца используется по максимуму, когда СЭС наиболее загружена. Однако есть и недостаток этого режима – от сети в нагрузку всегда будет забираться определенная мощность (минимум 20–100 Вт), т. е. из сети будет потребляться большее количество энергии (1,95 кВт·ч) по сравнению с режимом принудительной генерации (1,27 кВт·ч). Параметр режима «Процент подкачки» устанавливается опытным путем и зависит от нагрузки. Если нагрузка постоянная, то процент подкачки можно сделать небольшим, чтобы напряжение АКБ не было всегда рядом с $U_{\min\text{ЭКО}}$. Если нагрузка редкая, то процент подкачки можно сделать больше, чтобы при нехватке энергии солнца можно было забрать энергию с АКБ. Исследования в зимнее время и выбор оптимального процента подкачки планируется провести в будущем. Также планируется в дальнейшем исследовать режимы работы фотоэлектрических модулей при подключении бытовых и промышленных потребителей в Арктической зоне, а также работу установок в темное время суток при подключении освещения.

3. Для электроснабжения осветительной установки и стенда теплового насоса мощностью 1100 Вт автономный режим работы СЭС без сети с установленной мощностью СП 1200 Вт может использоваться летом в солнечные дни.

Литература

1. Обухов, С.Г. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации / С.Г. Обухов, И.А. Плотников // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328, № 6. – С. 38–51.
2. Shivarama, K.K. A review on hybrid renewable energy systems / K.K. Shivarama, K.K. Sathish // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 52. – P. 907–916. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.187
3. Upadhyay, S. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems / S. Upadhyay, M.P. Sharma // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 38. – P. 47–63. DOI: 10.1016/j.rser.2014.05.057
4. Kusakana, K. Hybrid diesel generator/renewable energy system performance Modeling / K. Kusakana, H.J. Vermaak // *Renewable Energy*. – 2014. – Vol. 67. – P. 97–102. DOI: 10.1016/j.renene.2013.11.025
5. *Practical handbook of photovoltaics: Fundamentals and applications* / Ed. by T. Markvart, L. Castafier. – Hoboken, John Wiley & Sons Inc. – 2012. – 1244 p.
6. Обухов, С.Г. Модель солнечной панели в MATLAB SIMULINK / С.Г. Обухов, И.А. Плотников // *Альтернативная энергетика и экология: Международный научный журнал*. – 2014. – № 21 (161). – С. 51–59.
7. Mussard, M. Solar energy under cold climatic conditions: A review / M. Mussard // *Renew Sustain Energy Rev*. – 2017. – Vol. 74. – P. 733–745. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.009

Бутаков Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Высшей школы энергетике, нефти и газа, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск; ser-butakov@yandex.ru.

Червочков Александр Сергеевич, магистрант, магистерская программа «Оптимизация систем электроснабжения», Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск; chervochkov1995@mail.ru.

Поступила в редакцию 18 ноября 2018 г.

DOI: 10.14529/power180407

EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC MODULES OPERATION MODES IN ARCTIC CONDITIONS

S.V. Butakov, ser-butakov@yandex.ru,

A.S. Chervochkov, chervochkov1995@mail.ru

M.V. Lomonosov Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russian Federation

Photovoltaic modules in hybrid power plants are increasingly used to supply power to isolated consumers, for example, those in the Arctic Zone. The control systems operating modes and settings selection, which ensures the efficient solar power plant operation, is of high importance and requires comprehensive research in the climatic conditions of the Arctic Zone. The paper presents the results of experimental studies into the efficiency of the operating modes employed at a solar power plant located in the city of Arkhangelsk. Autonomous operation mode, forced generation mode and pumping mode are analyzed. Recommendations on the use of these modes with effective settings parameters are suggested.

Keywords: solar power station, Arctic zone, photoelectric module, controller, generation, electric network.

References

1. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. [Simulation Model of Operation of Autonomous Photovoltaic Plant under Actual Operating Conditions]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 38–51. (in Russ.)
2. Shivarama K.K., Sathish K.K. A Review on Hybrid Renewable Energy Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 907–916. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.187

3. Upadhyay S., Sharma M.P. A Review on Configurations, Control and Sizing Methodologies of Hybrid Energy Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 38, pp. 47–63. DOI: 10.1016/j.rser.2014.05.057
4. Kusakana K., Vermaak H.J. Hybrid Diesel Generator/Renewable Energy System Performance Modeling. *Renewable Energy*, 2014, vol. 67, pp. 97–102. DOI: 10.1016/j.renene.2013.11.025
5. *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Ed. by T. Markvart, L. Castafier. Hoboken, John Wiley & Sons Inc., 2012. 1244 p.
6. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. [Model of Solar Module in MATLAB SIMULINK]. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2014, no. 21 (161), pp. 51–59. (in Russ.)
7. Mussard M. Solar Energy under Cold Climatic Conditions: A Review. *Renew Sustain Energy Rev*, 74, 2017, pp. 733–745. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.009

Received 18 November 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Бутаков, С.В. Эффективность режимов работы фотоэлектрических модулей в условиях Арктической зоны / С.В. Бутаков, А.С. Червочков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 59–67. DOI: 10.14529/power180407

FOR CITATION

Butakov S.V., Chervochkov A.S. Efficiency of Photovoltaic Modules Operation Modes in Arctic Conditions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 59–67. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180407
