

УДК 621.548(075.8)

**С. Н. Чижма, С. В. Молчанов, П. А. Матюнин
А. И. Захаров, А. Н. Алещенко**

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МОБИЛЬНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С НЕСТАЦИОНАРНОЙ НАГРУЗКОЙ

5

Объектом исследования является система электроснабжения на базе солнечной электростанции с нестационарной нагрузкой на примере автоматической торговой установки (вендингового аппарата Coffemar G-546). Цель работы – экспериментальное исследование влияния динамики мощности солнечного излучения на объем выработанной электроэнергии, исследование энергетического баланса испытательной установки, исследование возможностей и разработка рекомендаций по оптимизации энергетических потерь в низковольтном режиме работы оборудования.

The object of the research is a power supply system based on a solar power plant with a non-stationary load on the example of an automatic trading unit (vending machine Coffemar G-546). The aim of the work is an experimental study of the influence of solar radiation power dynamics on the volume of electricity generated, the study of the energy balance of the test facility, the study of the possibilities and development of recommendations for optimizing energy losses in the low-voltage mode of the equipment.

Ключевые слова: мобильная солнечная электростанция, автоматическая торговая установка, вендинговый аппарат, солнечные панели, потребляемая мощность.

Keywords: mobile solar power plant, automatic trading plant, vending machine, solar panels, power consumption.

Введение

Солнечные электростанции в большинстве своем используются для электроснабжения стационарных объектов, например частных домов, ферм и т.д. В то же время в ряде случаев возникает необходимость электроснабжения нетрадиционных устройств, например торговых аппаратов, имеющих случайный характер нагрузки. Примером таких автоматов являются вендинговые машины, кофемашины. Вендинг получил широкое распространение в мире как удобный и нетребовательный способ вести торговлю или оказывать услуги.



Одной из серьезных проблем использования вендинговых аппаратов является их электропитание. Зачастую получить возможность электроснабжения для вендингового аппарата затруднительно, то есть нет технической возможности, требуется много согласований и обременений, что приводит к экономической нецелесообразности таких решений.

Есть случаи, когда вендинговые аппараты необходимо использовать в мобильном виде, например при организации выездных мероприятий. Тогда наиболее рациональным решением представляется использование мобильных энергетических установок, в первую очередь источников электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии.

Настоящее исследование посвящено определению возможности работы вендинговых аппаратов совместно с энергетическими установками на основе солнечных панелей, изучению возможностей конфигурации энергоустановок при различном электропотреблении.

Цели экспериментальных исследований

Целями работы являются экспериментальное исследование влияния динамики мощности солнечного излучения на объем выработанной электроэнергии мобильной энергетической установкой в зависимости от погодных условий для данного географического положения с целью оценки энергоемкости, необходимой для электроснабжения оборудования;

- исследование энергетического баланса испытательной установки в различных режимах эксплуатации в дневное и вечернее время;
- исследование возможностей и разработка рекомендаций для снижения энергетических потерь в низковольтном режиме работы оборудования.

Модель нагрузки

Для МСЭ нагрузкой является вендинговый аппарат *Coffemar G-546* [1], предназначенный для круглосуточной работы, его питание осуществляется от сети переменного тока 220 В, паспортная мощность аппарата составляет 1100 Вт.

Были проведены экспериментальные исследования реального потребления электроэнергии аппаратом *Coffemar G-546*. На рисунке 1 показан график мощности, потребляемой *Coffemar G-546* в режиме выдачи трех порций кофе и нагрева воды для следующей порции.

Эксперимент показывает, что в режиме ожидания мощность, потребляемая аппаратом, составляет 100 Вт, в режиме приготовления мощность потребления возрастает до 1 кВт в течение 20 с. После приготовления происходит нагрев воды и аппарат переходит в режим ожидания.

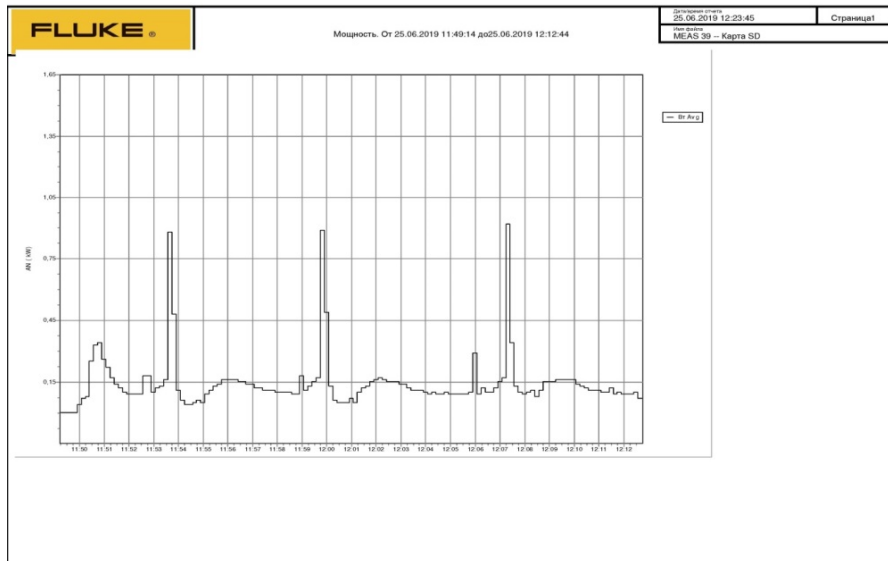


Рис. 1. Мощность потребления аппарата в режиме приготовления трех порций кофе

В соответствии с графиком потребления, представленном на рисунке 1, в результате измерений определено, что энергопотребление исследуемого торгового аппарата составит $3,6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{сутки}$.

Модель солнечной радиации

Величина первичной солнечной энергии, которая доступна для преобразования мобильной солнечной энергетической установкой, определяется интенсивностью суммарного солнечного излучения в месте ее установки и зависит от географических координат месторасположения МСЭ, пространственной ориентации солнечных панелей (СП), а также от внешних метеорологических факторов: температуры воздуха, уровня облачности, коэффициента отражения земной поверхности.

Для нахождения уровня инсоляции используется методология NASA [2; 3], по которой доля рассеянной радиации определяется из системы полиномиальных уравнений в функции от широты местности, индекса прозрачности, часового угла заката и полуденного угла высоты Солнца над горизонтом.

На рисунке 2 показан рассчитанный профиль инсоляции для Калининградской области на поверхности солнечной панели, наклоненной на 30° для 21 декабря, 21 июня и 1 марта. Анализ представленных данных показывает, что зимняя инсоляция (январь) меньше летней (июнь) в четыре раза.

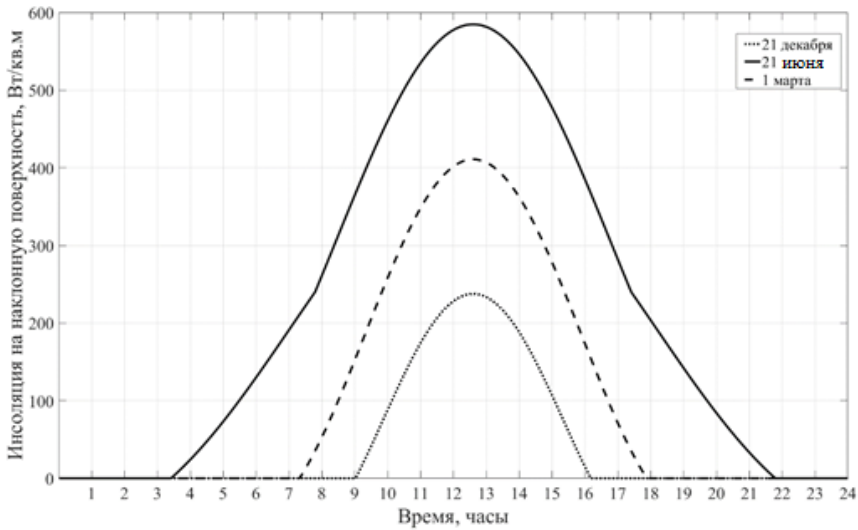


Рис. 2. Инсоляция, приходящаяся на поверхность СП

Модель солнечной батареи

Для построения модели СП использовалась методика [4], согласно которой максимальная выходная мощность СП определяется по выражению

$$P_{PV} = C_{FF} N_{FM} \eta_{conv} G \ln(10^6 G) / T_{FM}, \quad (1)$$

где N_{FM} – число СП; C_{FF} – постоянный коэффициент СП; η_{conv} – КПД преобразователя; G – текущий уровень солнечной радиации, Вт/м²; T_{FM} – текущая температура СП.

В отличие от рассмотренной методики, для определения величины коэффициента C_{FF} будем использовать более точное выражение [5]

$$C_{FF} = \frac{FF T_{ref}}{G_{ref}} \times \frac{[I_{SC} + k_I(T_{FM} - T_{ref})][V_{OC} + k_V(T_{FM} - T_{ref})]}{\ln(10^6 G_{ref})}, \quad (2)$$

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

Коэффициент заполнения ВАХ СП определялся по данным их технической спецификации: I_{MPP} , V_{MPP} – паспортные значения тока и напряжения СП в точке максимальной мощности при стандартных условиях; I_{SC} , V_{OC} – паспортные значения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода СП при стандартных условиях.

Модель СП, реализованная в виде подсистемы в *MatLab / Simulink*, представлена на рисунке 3.

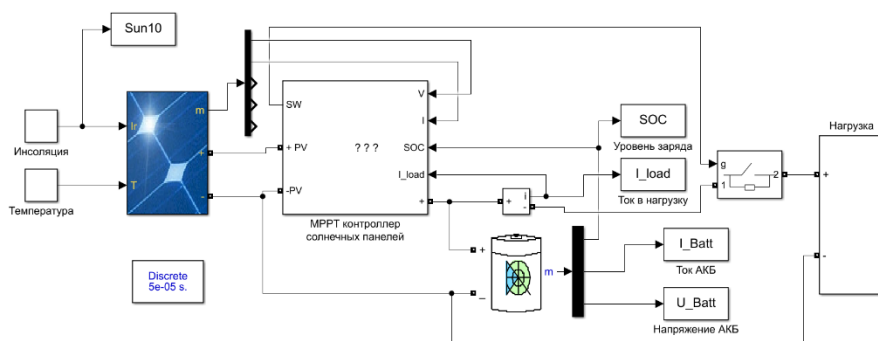


Рис. 3. Модель солнечной панели в MatLab / Simulink

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

Проведем расчет энергогенерации МСЭ отдельно для самого солнечного периода – июня и наименее солнечного периода – декабря. Величина инсоляции определяется в соответствии с рисунком 2. Прием для расчета усредненные данные за пять лет для июня Калининградского региона.

Общее количество энергии, которая может быть сгенерирована СП за сутки (без учета температурного дрейфа вольт-амперных характеристик), найдено через расчетные значения солнечной радиации $G(t)$ и данные технической спецификации используемых СП CHN240-60P [6]:

$$W_{PV} = \eta_{FM} S_{FM} N_{FM} \int_0^{24} G(t) dt, \tag{3}$$

где $\eta_{FM}=0,1694$ – КПД фотоэлектрического модуля; $S_{FM}=1,63 \text{ м}^2$ – площадь СП; $N_{FM}=1$ – количество СП. При указанных значениях параметров будет выработано 2,6 кВт*час/сутки.

Для рассматриваемого дня года расчетная суточная выработка электрической энергии СП составила 2,6 кВт*ч. Суточная зимняя электроэнергия составляет 0,65 кВт*ч.

Анализ результатов моделирования позволит провести детальную оценку энергетического баланса МСЭ. Определим выработку МСЭ.

Максимально возможное количество энергии, которую может получить потребитель от данной МСЭ за сутки в рассматриваемый день:

$$W_{нагр} = W_{PV} \eta_1 \eta_2 \eta_3. \tag{4}$$

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



инвертора — $\eta_3 = 0,9$. Для указанных коэффициентов преобразования выработка одной солнечной панели летом за сутки составит 1,9 кВт*ч, зимой — 0,48 кВт*ч.

Анализ соотношения генерации и потребления показывает, что для полноценного обеспечения нагрузки электроэнергией необходимо летом 2, а зимой — 8 СП. Такое количество СП явно избыточно, необходимо провести оптимизацию системы с целью уменьшения количества СП.

Оптимизация электрогенерации и потребления кофеаппарата

10

Так как известен тип нагрузки МСЭ, имеется возможность оптимизации системы «источник электроэнергии — нагрузка» с целью уменьшения количества солнечных панелей.

1. Отключение кофеаппарата ночью. Для уменьшения потребления электроэнергии кофеаппаратом предлагается отключать его в ночное время — с 20:00 по 08:00. В этом случае суточное потребление уменьшится до 2 кВт*ч/сутки.

2. Сокращение времени работы кофеаппарата за счет увеличения темного времени суток зимой, в среднем время работы будет составлять 10 ч. Графическая интерпретация двух предложенных методов показана на рисунке 4.

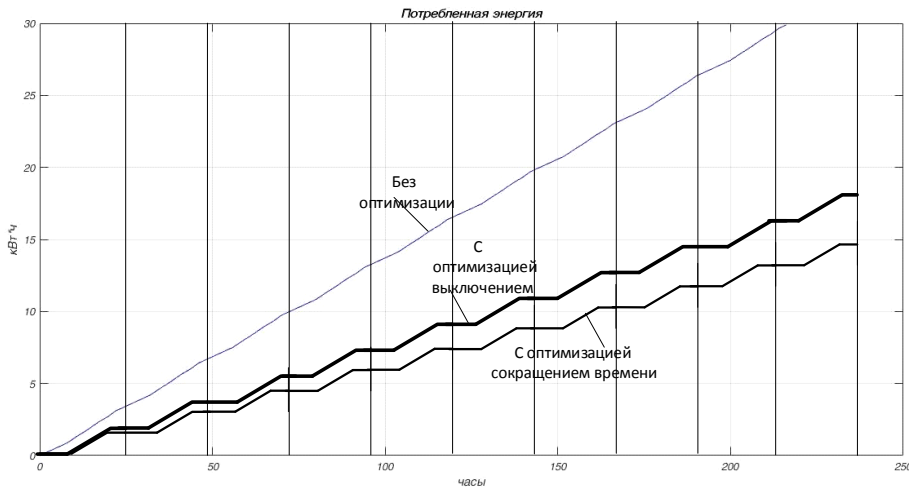


Рис. 4. Потребление электроэнергии кофеаппаратом за 200 ч при сокращении времени активной работы

3. Увеличение мощности солнечных панелей. Анализ энергообеспеченности кофеаппарата показывает, что при увеличении мощности солнечных панелей с 240 до 320 Вт летом электроэнергия, вырабатываемая одной солнечной панелью, увеличится до 3,4 кВт*ч/сутки, зимой — до 0,86 кВт*ч/сутки.



4. Переход от ШИМ- к МРРТ-контроллеру солнечных панелей. ШИМ-контроллер (широтно-импульсная модуляция) солнечных панелей позволяет задавать выходной ток без учета мощности, генерируемой солнечными панелями.

МРРТ-контроллер (maximum power point tracking) подстраивает систему под текущий режим солнечной панели, выводя ее на максимум генерируемой мощности. Повышение мощности при использовании МРРТ-контроллера составляет 10 %.

При реализации всех четырех мероприятий электроэнергия, вырабатываемая МСЭУ, которая содержит три СП, составляет зимой 2,1 кВт*ч/сутки при потреблении 2,0 кВт/ч, летом – 8,2 кВт*ч/сутки, чего вполне достаточно для питания нагрузки.

11

Экспериментальные исследования электроснабжения нагрузки

Для оценки результатов моделирования был произведен эксперимент по определению объема выработанной электроэнергии и ее потреблению нагрузкой. Использовались следующие измерительные приборы: *Fluke 437* – многофункциональный измеритель параметров электроэнергии, *Fluke 345* – токоизмерительные клещи, *Fluke 289* – регистратор-мультиметр.

Мобильная энергетическая установка выполнена на колесном шасси и содержит:

- четыре фотоэлектрических панели *CHN240-60P*, каждая мощностью 240 Вт. Максимальное выходное напряжение каждой панели – 35 В, ток – 8 А. Панели подключены параллельно;
- четыре контроллера солнечной панели;
- контроллер заряда аккумуляторной батареи;
- аккумуляторную батарею емкостью 524 А*ч напряжением 24 В;
- инвертор 24/220 В.

Экспериментальные исследования системы электропитания проводились по схеме, представленной на рисунке 5.

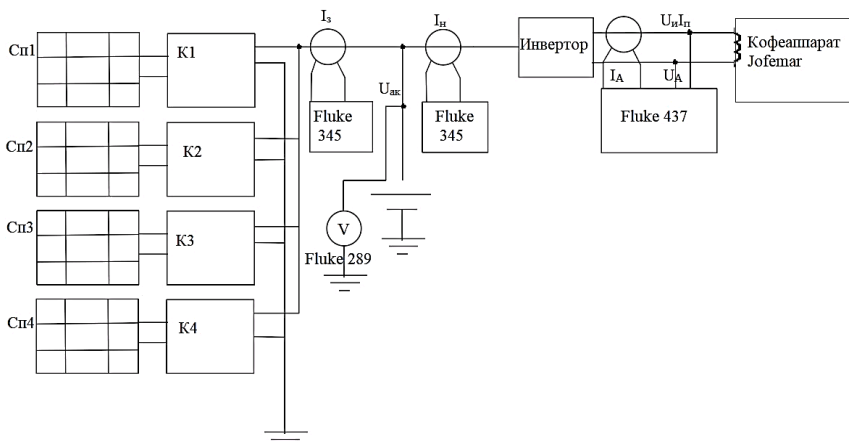


Рис. 5. Схема эксперимента



Было проведено экспериментальное исследование по определению состояния аккумуляторной батареи (АКБ) в течение суток. При полном освещении АКБ полностью заряжается за 4 ч, за ночной период разряд батареи составляет 20 % (рис. 6).

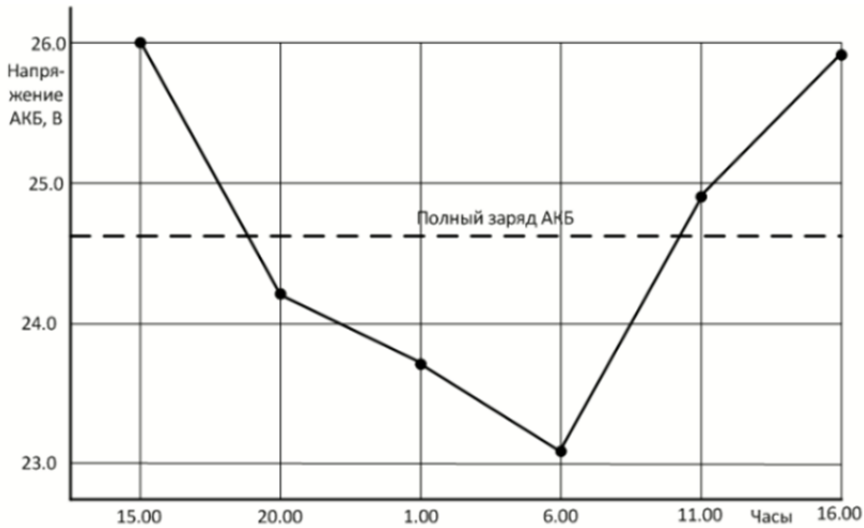


Рис. 6. График изменения напряжения аккумуляторной батареи

Вывод. Представленные экспериментальные данные показывают, что при данной конфигурации мобильной энергетической установки ее генерируемой электроэнергии достаточно для круглосуточного электропитания вендингового аппарата.

Заключение

Разработана оригинальная имитационная модель МСЭ, обеспечивающая исследование ее рабочих режимов в реальных условиях эксплуатации.

Исходными данными моделирования являются широта и долгота местности, индекс прозрачности атмосферы, альbedo земной поверхности, время года, ориентация СП, технические характеристики СП, характеристики нагрузки.

В процессе моделирования рассчитываются временные тренды интенсивности солнечной радиации, энергетические характеристики СП: ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, коэффициент заполнения ВАХ и выходная электрическая мощность.

Полученные при моделировании режимов МСЭ результаты обеспечивают возможность аргументированного выбора рационального режима эксплуатации МСЭ, требуемой емкости накопительных устройств, установленной мощности и номинального напряжения солнечной батареи, мощности преобразователей, а также определения эффективных алгоритмов управления МСЭ.



Список литературы

1. *Coffeemar G-546* // Vendmarket.net. URL: https://vendmarket.net/support/jofemar/coffeemar-g546/coffeemar_g-546_manual.pdf (дата обращения: 06.09.2019).
2. *The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set* // Power Data Access Viewer. URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (дата обращения: 06.09.2019).
3. *World Radiation Data Centre*. URL: <http://wrdc.mgo.rssi.ru/> (дата обращения: 03.03.2019).
4. Jones A. D., Underwood C. P. A thermal model for photovoltaic systems // *Solar Energy*. 2001. Vol. 70 (4). P. 349–359.
5. Обухов С. Г., Плотников И. А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2017. Т. 328, №6. С. 38–51.
6. *CHN240-60P* // МосИнвертор. URL: http://www.mos-invertor.ru/assets/files1/sm_chn/datasheet_chn240-60p.pdf (дата обращения: 01.06.2019).

Об авторах

Сергей Николаевич Чижма — д-р техн. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.
E-mail: chisn@yandex.ru

Сергей Васильевич Молчанов — канд. физ-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.
E-mail: SMolchanov@kantiana.ru

Петр Александрович Матиунин — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.
E-mail: PMatiunin@rantiana.ru

Артем Игоревич Захаров — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.
E-mail: AIZakharov@kantiana.ru

Алексей Николаевич Алешенко — доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.
E-mail: AAleshchenko@kantiana.ru

The authors

Prof. Sergey N. Chizhma, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
E-mail: chisn@yandex.ru

Dr Sergey V. Molchanov, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
E-mail: SMolchanov@kantiana.ru

Petr A. Matiunin, PhD Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
E-mail: PMatiunin@kantiana.ru

Artem I. Zakharov, PhD Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
E-mail: AIZakharov@kantiana.ru

Aleksey N. Aleshchenko, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
E-mail: AAleshchenko@kantiana.ru