

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»
«Академия электротехнических наук Чувашской Республики»

**ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ЭНЕРГЕТИКИ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

**Материалы
III Международной научно-технической
конференции**

Чебоксары
2019

УДК 621.3(06)
ББК 31я43
П78

Редакционная коллегия:

В.Г. Ковалев, канд. техн. наук, профессор (гл. редактор);
Г.С. Нудельман, канд. техн. наук, профессор;
В.А. Щедрин, канд. техн. наук, профессор (зам. гл. редактора);
В.В. Афанасьев, д-р техн. наук, профессор;
Ю.М. Миронов, д-р техн. наук, профессор;
Г.П. Свинцов, д-р техн. наук, профессор;
А.А. Ильин, канд. техн. наук, доцент;
О.А. Онисова, канд. техн. наук, доцент

*Печатается по решению Научно-технического совета
Чувашского государственного университета*

П78 Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – 618 с.

ISBN 978-5-7677-2998-2

Представлены статьи и доклады третьей Международной научно-технической конференции, проведенной совместно с «Академией электротехнических наук Чувашской Республики», в которых приводятся и обсуждаются результаты актуальных научных исследований в области энергетики, электротехники и энергоэффективности, а также рассматриваются вопросы подготовки инженерных кадров.

Для преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов старших курсов энергетических специальностей вузов, инженерно-технического персонала предприятий и энергосистем.

ISBN 978-5-7677-2998-2

УДК 621.3(06)
ББК 31я43

© Издательство
Чувашского университета, 2019

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Федотов А.Ю., Наумов В.А., Антонов В.И., ООО НПП «ЭКРА», ЧГУ им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия.

***Аннотация.** На энергетической характеристике $P(U)$ фотомодулей существует точка максимальной выработки энергии. Отслеживание системой управления этой точки путем изменения напряжения на зажимах секции фотомодулей при равномерной освещенности простая задача, но при появлении затенения фотомодулей возникают эффекты, присутствие которых должно быть учтено в работе систем управления солнечными электрическими станциями. В работе рассматриваются особенности и методы поддержания энергоэффективности солнечных электрических станций в этих условиях.*

***Ключевые слова:** Солнечные электрические станции, фотомодули, методы отслеживания точки максимальной мощности.*

Изменение освещенности и температуры фотомодулей влияет на их характеристики и приводит к смещению рабочей точки от точки максимальной мощности (в англоязычной литературе *Maximum Power Point – MPP*), снижая тем самым выработку электроэнергии. Для эффективной эксплуатации фотомодулей требуется поддерживать рабочую точку в точке максимальной мощности на энергетической характеристике $P(U)$. В одинаковых условиях работы всех фотомодулей солнечной станции эта задача не представляет сложности, поскольку на энергетической характеристике лишь один экстремум. Однако в условиях частичного затенения фотомодулей, на энергетической характеристике появляются локальные пики, и требуются специальные методы управления режимами работы фотомодулей солнечной электрической станции (СЭС).

В настоящей работе рассматриваются методы поддержания максимальной мощности солнечных электрических станций в условиях как равномерного освещения, так и частичного затенения фотомодулей.

Характеристики фотомодулей при равномерной освещенности

При равномерном освещении и постоянной температуре энергетическая $P(U)$ характеристика фотомодуля имеет единственный максимум (рис. 1).

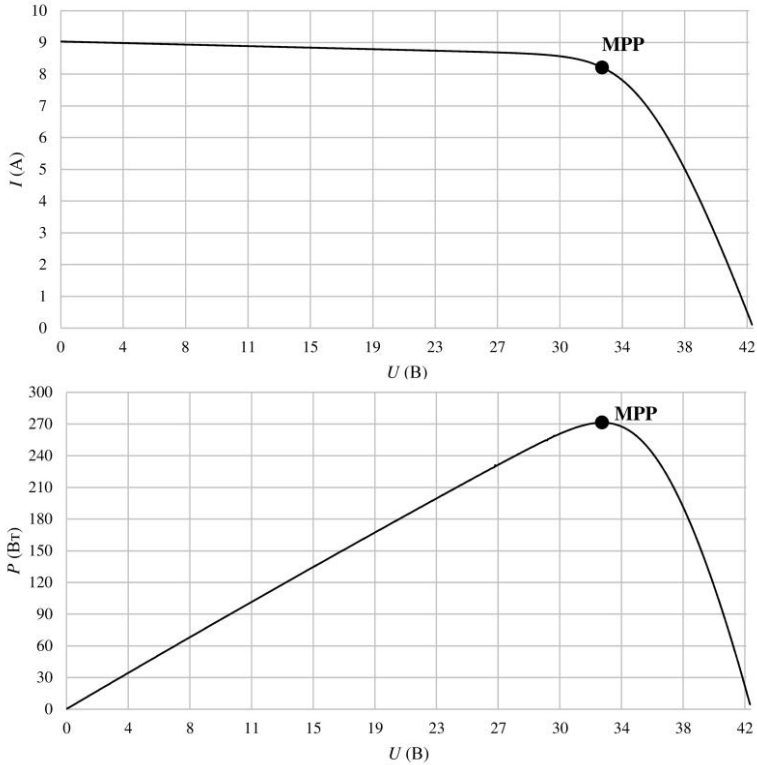


Рис. 1. Вольт-амперная и энергетическая характеристики фотомодуля при равномерном освещении. Здесь и далее все характеристики приведены для фотомодулей Hevel HVL 270

Освещенность и температура могут в значительной мере изменяться в течение светового дня. Их влияние на характеристики СЭС различно: освещенность определяет величину генерируемого тока (рис. 2, *а*), а температура – напряжение холостого хода (рис. 2, *б*).

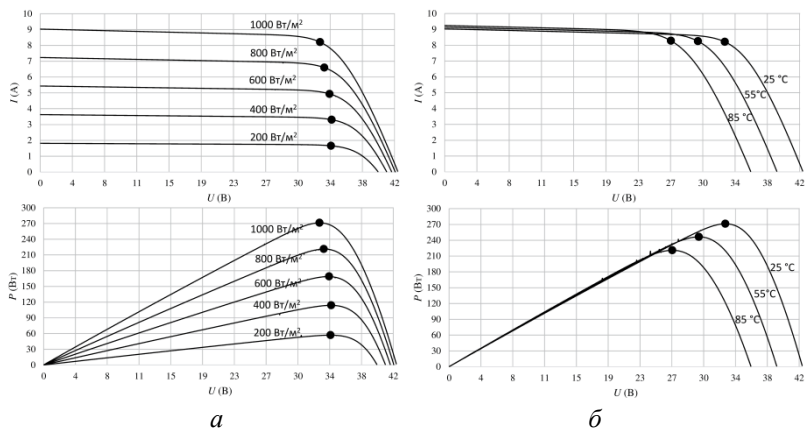


Рис. 2. Влияние уровня освещенности (а) и температуры (б) на характеристики фотомодуля. Точками обозначены МРР

В условиях равномерной освещенности точки МРР располагаются на характеристиках вблизи напряжения, равного 80% напряжения холостого хода U_{oc} . Однако при изменении температуры фотомодулей напряжение U_{oc} меняется и точка МРР существенно смещается по оси напряжений, хотя величина вырабатываемого тока остается практически неизменной.

Управление солнечной электростанцией

Ключевыми элементами солнечных фотоэлектрических станций (рис. 3) являются фотомодули, соединенные в секции. Однотипные фотомодули объединяются в последовательные группы для получения необходимого напряжения, а группы соединяются параллельно для получения необходимой силы тока [10]. Для согласования выходного сопротивления фотомодулей с входным сопротивлением инвертора используются преобразователи постоянного напряжения в постоянное (*DC–DC converter*). Одной из важнейших задач преобразователя является реализация функции отслеживания точки МРР с целью поддержания максимальной энергоэффективности СЭС. Инверторы преобразуют постоянное напряжение в переменное.

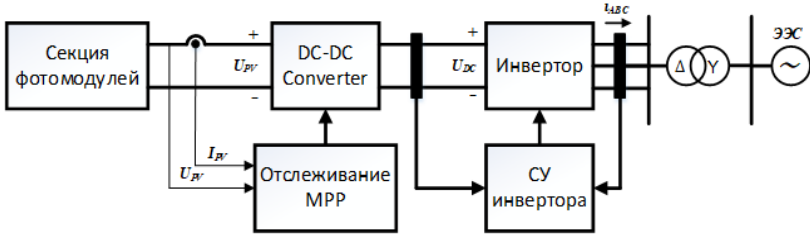


Рис. 3. Схема солнечной фотоэлектрической станции

Для получения максимальной мощности от фотомодуля, к нему необходимо подключить оптимальную нагрузку, зависящую от *MPP*. Тогда напряжение и ток будут соответствовать точке *MPP* для текущих условий работы станции. С этой целью напряжение на выходе фотомодулей регулируется преобразователем постоянного напряжения в постоянное путем изменения его опорного напряжения U_{ref} (рис. 4).

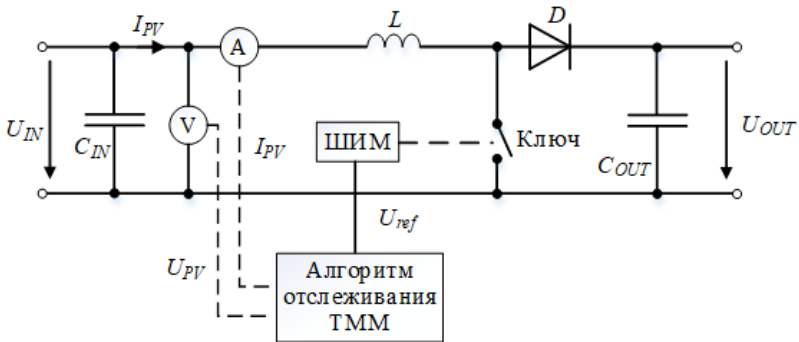


Рис. 4. Упрощенная схема преобразователя постоянного напряжения.

U_{PV} и I_{PV} – напряжение и ток секции фотомодулей

Алгоритм отслеживания *MPP* корректирует коэффициент заполнения импульсов (*duty cycle*) ШИМ-сигнала, задавая уровень потребления энергии инвертором и, тем самым, меняя величину выходного напряжения фотомодулей.

Методы поддержания эффективности фотомодулей

Хотя для отслеживания *MPP* в условиях изменения освещенности известно множество методов [1–3], широкое распро-

странение получил лишь метод «возмущения и наблюдения» (*Perturb and Observe – P&O*) благодаря своей простоте и наглядности.

В методе «возмущения и наблюдения» (*P&O*) напряжение на выходе фотомодуля непрерывно изменяется на незначительную величину и определяется знак приращения мощности. Если знак приращения при снижении напряжения положителен, то точка *MPP* находится слева (рабочая точка оказалась в точке 1 рис. 5). Если же при повышении напряжения знак приращения положителен, то точка *MPP* находится справа (рабочая точка оказалась в точке 2). В первом случае напряжение снижают, а во втором увеличивают до достижения точки *MPP*. В итоге рабочая точка будет колебаться около точки *MPP*.

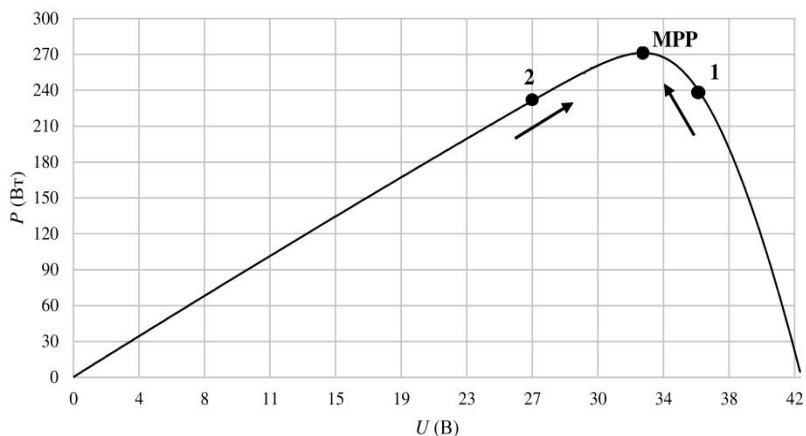


Рис. 5. Поддержание *MPP* методом *P&O*

В случае изменения освещенности происходит изменение величины вырабатываемого тока, и солнечная станция переходит на другую энергетическую характеристику $P(U)$ (на рис. 6 изменение режима приводит к переходу станции от характеристики 1 к характеристике 2). Но при равномерной освещенности такой переход не изменит сути алгоритма *P&O*, и точка *MPP* будет найдена стандартным методом.

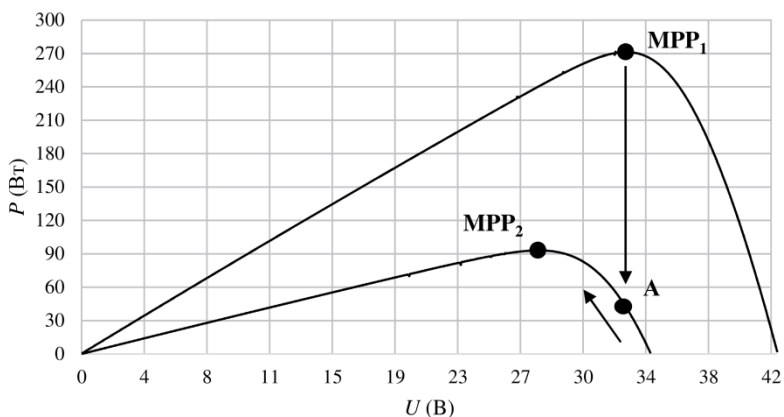


Рис. 6. Поддержание *MPP* методом *P&O* при изменении уровня освещенности и температуры

Проблемы затенения, характеристики и методы обеспечения энергетической эффективности

Под частичным затенением понимаются условия, при которых освещенность фотомодулей СЭС отличается, например, из-за появления туч на небе. Вследствие этой неравномерности освещения на энергетической характеристике $P(U)$ появляются локальные пики (рис. 7).

В условиях частичного затенения задача поиска *MPP*, а значит, и поддержания эффективности работы фотомодулей значительно усложняется. И методы отслеживания *MPP*, не учитывающие наличие нескольких максимумов, могут привести рабочую точку к локальным пикам (A, B и C на рис. 7), существенно уменьшая эффективность работы фотомодулей.

Методы управления эффективностью СЭС в условиях затененности должны решить задачу выявления режима затененности и задачу поиска глобального максимума (точки *MPP*) среди локальных максимумов на энергетической характеристике. Кажущаяся простота решения этих задач сталкивается с ограничениями технологического характера: станция не может находиться в режиме поиска *MPP* с изменением напряжения на выходе фотомодулей в широком диапазоне. Поэтому алгоритмы поиска *MPP* в режиме затенения должны обеспечивать быстрое определение глобального *MPP*.

Для поиска *MPP* и поддержания эффективности фотомодулей в условиях частичного затенения разработаны различные методы [4 – 6, 9]. Они отличаются друг от друга надежностью, быстродействием, ресурсоемкостью.

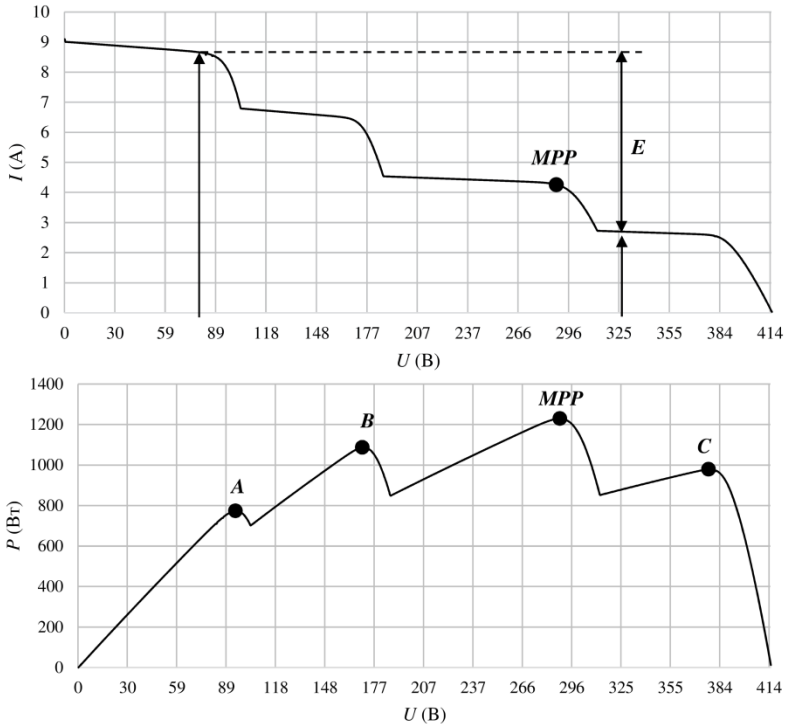


Рис. 7. ВАХ и $P(U)$ фотомодулей при частичном затенении

Так, в алгоритме фирмы Siemens возникновение режима частичного затенения предлагают определять путем измерения разности токов стринга при минимально возможном U_{\min} для инвертора входном напряжении и напряжении предполагаемой точки *MPP* $U_{ref} = 0,8U_{\max}$. Если абсолютная величина этой разности E превышает заданный порог, то вызывается процедура определения глобального максимума, иначе рабочую точку оставляют на прежнем месте.

Для определения глобального максимума можно воспользоваться алгоритмом, изложенным в [7]. Для выявления точки *MPP* характеристика $P(U)$ делится на несколько участков. Каждый участок последовательно сканируется на наличие пика. Величина нового пика сравнивается с ранее обнаруженным? и наибольший из них принимается в качестве глобального пика. После окончания сканирования характеристики $P(U)$ напряжение устанавливается в точке наибольшего из обнаруженных пиков, принимаемой за *MPP*. В дальнейшем эта точка будет поддерживаться алгоритмом *P&O*.

«Искусственный интеллект» в задачах поддержания энергоэффективности СЭС

Во множестве работ рассматривается значительное число различных методов, так или иначе использующих «искусственный интеллект» для поиска точки *MPP* [9]. Анализ работ показывает тенденцию к использованию искусственного интеллекта как некоторого универсального метода, способного к оптимальному управлению режимом СЭС. Часто возможности искусственного интеллекта воспринимаются как исключительные, полагая, что вся проблема построения системы управления заключается только в выборе «правильного» принципа построения нейронной сети. В то же время не вызывает сомнения, что эффективность применения искусственного интеллекта зависит в значительной мере от обучающей выборки прецедентов, от ее полноты. Необходимо первоначально выработать правила формирования прецедентов, трансформирующие характеристики фотомодулей в пространство контролируемых нейронной сетью данных. Нами ведется активная работа в данном направлении, результаты которой будут опубликованы в последующих статьях.

Выводы

Для эффективной выработки электроэнергии солнечной электрической станции необходимо поддерживать рабочую точку фотомодулей вблизи точки наибольшей мощности на энергетической характеристике $P(U)$. Когда фотомодули солнечной электрической станции находятся в одинаковых условиях эта задача простая, но существенно усложняется в условиях частичного затенения из-за появления на энергетической характери-

стике солнечной электрической станции локальных пиков. Система управления солнечных электрических станций должна обеспечивать выявлением глобального максимума при частичном затенении фотомодулей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hohm D. P., Ropp M. E.* "Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms". Progress in Photovoltaics: Research and Applications. pp: 47–62. doi:10.1002/pip.459

2. *Esram T., Chapman P.L.*, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, June 2007.

3. *Малинин Г.В., Серебрянников А.В.* Слежение за точкой максимальной мощности солнечной батареи // Вестник ЧГУ. 2016. – № 3. – С. 76–93.

4. *Miyatake M., Inada T.*, "Control characteristics of a Fibonacci-based maximum power point tracker when a photovoltaic array is partially shaded," in Proc. IEEE IPEMC, 2004, vol. 2, pp. 816–821.

5. *Kobayashi K., Takano I., Sawada Y.*, "A study of a two stage maximum power point tracking control of a photovoltaic system under partially shaded insolation conditions," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 90, no. 18/19, pp. 2975–2988, Nov. 2006.

6. *Solodovnik E.V., Liu S., Dougal R. A.*, "Power controller design for maximum power tracking in solar installations," IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 5, pp. 1295–1304, Sep. 2004.

7. *Patel H., Agarwal V.*, "Maximum Power Point Tracking Scheme for PV Systems Operating under Partially Shaded Conditions" IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 4, April 2008.

8. *Федотов А.Ю., Наумов В.А., Антонов В.И.* Задачи и методы поддержания эффективности солнечных электрических станций. // РЕЛАВЭКСПО – 2019. Сборник докладов научно-технической конференции молодых специалистов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 224 – 231.

9. *Seyedmahmoudian M., Horan B., Soon T. Kok, Rahmani R., Than Oo A. Muang, Mekhilef S., Stojcevski, A.* "State of the art artificial intelligence-based MPPT techniques for mitigating partial shading effects on PV systems – A review" Renewable and Sustainable Energy Reviews.: pp. 435–455. doi:10.1016/j.rser.2016.06.053.

10. Солнечная энергия Сакмарской СЭС под контролем // Релейная защита и автоматизация. 2016. – №1.– С. 15.

Авторы:

Федотов Александр Юрьевич, инженер 2 категории, ООО НПП «ЭКРА». В 2015 году окончил факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: fedotov_ay@ekra.ru

Наумов Владимир Александрович, заместитель генерального директора – технический директор ООО НПП «ЭКРА». В 2005 году защитил во ВНИИЭ кандидатскую диссертацию «Анализ и совершенствование продольных дифференциальных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор». E-mail: naumov_vy@ekra.ru

Антонов Владислав Иванович, профессор кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, главный специалист департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». В 2018 году защитил докторскую диссертацию «Теория и приложения адаптивного структурного анализа сигналов в интеллектуальной электроэнергетике». E-mail: antonov_vi@ekra.ru

ОТДЕЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Закирова Н.Ж., Истоппенников М.А., Павлов П.П.,
ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Республика Татарстан, Россия.

Аннотация. В статье рассмотрена взаимосвязь электроэнергетического комплекса с экономикой страны, отдельные проблемные вопросы в электроэнергетической сфере и предложены возможные пути их решения.

Ключевые слова: Электроэнергетика, экономика энергетики, основные фонды, электроэнергетический комплекс, энергетическая безопасность.

Электроэнергетика является основой экономики и жизнеобеспечения любого государства и играет особую роль. Во многих странах одним из проблемных и сложных комплексов является электроэнергетический комплекс, т.к. он затрагивает многие сферы деятельности различных предприятий (тепловые и другие электростанции, транспорт нефти и нефтепродуктов, добыча газа, нефти и угля и др.).