

УДК 620.92

**Оптимизация процесса сбора солнечной энергии при питании  
беспроводного датчика метана  
от возобновляемых источников энергии**

**Саба Акбари\*, Тхань Фонг Ку\*\***

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия \**

*\*e-mail: [akbarisaba@gmail.com](mailto:akbarisaba@gmail.com)*

*\*\*e-mail: [thanphongkshk@gmail.com](mailto:thanphongkshk@gmail.com)*

**Аннотация**

В последнее время наблюдается рост научных исследований по применению беспроводных сенсорных сетей (БСС) для мониторинга газового состава воздуха на промышленных предприятиях и в жилых зонах. Мониторинг концентрации метана считается одним примером в этой области. При отсутствии питания от кабельных линий, время работы беспроводного датчика метана ограничивается емкостью батарей. В случае, когда беспроводная сенсорная сеть содержит большое число датчиков или развернута в труднодоступном месте, как, например, имеет место в нефтегазовой отрасли, необходимость замены (зарядки) батарей является основным сдерживающим для развития беспроводных технологий фактором. В данной работе, для увеличения времени автономной работы беспроводных датчиков метана, предлагается разработка гибридного источника питания на базе возобновляемых энергии. Установка преобразует энергию Солнца и ветра в электрическую энергию,

которая аккумулируется в суперконденсаторах. В работе описаны два алгоритма, которые повышают эффективность зарядки суперконденсаторов в гибридных источниках питания. Первый алгоритм посвящен поиску точки максимальной мощности (MPPT) и позволяет использовать максимальную мощность солнечной панели. В соответствии с алгоритмом, поиск точки максимальной мощности осуществляется путем изменения времени разрядки и сравнения выходной мощности солнечной панели до и после зарегистрированных изменений. При достижении максимальной выходной мощности солнечной панели балансировка прекращается. Перебалансировка тока нагрузки солнечной панели выполняется периодически путем нового изменения времени разрядки. Второй алгоритм обеспечивает эффективный механизм переключения зарядки суперконденсаторов. Данные алгоритмы интегрированы в энергоустановку, которая предназначена для обеспечения питания автономного беспроводного датчика метана.

**Ключевые слова:** Беспроводной датчик метана, гибридный источник питания на основе возобновляемых источников энергии, алгоритм поиска точки максимальной мощности (MPPT), механизм переключения зарядки суперконденсаторов.

## **1. Введение**

В последнее время наблюдается рост научных исследований по применению беспроводных датчиков для мониторинга газового состава [1], [2], [3]. Мониторинг концентрации метана считается одним примером в этой области. При отсутствии питания от кабельных линий, время работы беспроводного датчика метана

ограничивается емкостью батарей [4]. Необходимо отметить, что датчики горючих газов имеют высокое потребление энергии [4], [5]. Процедура замены батарей в беспроводных сенсорных сетях, содержащих огромное количество датчиков требует больших временных затрат. При этом проблема еще больше усложняется, когда беспроводная сенсорная сеть развернута в неблагоприятных климатических условиях, что имеет место на различных промышленных комплексах, таких как нефтегазовая промышленность. Для того чтобы увеличить время автономной работы беспроводных датчиков, одним вариантом является проектирование платформы которая может аккумулировать энергию от источников возобновляемых энергий [6], [7], [8], [9], [10]. При сборе энергии от солнечной панели, можно проводить процесс аккумулирования энергии таким образом, чтобы максимальная мощность от панели была генерирована. Это реализуется путем применения алгоритмов, которые находят точку максимальной мощности солнечной панели [11], [12], [21]. Эти методы позволяют увеличить эффективность процесса зарядки. В статье представлены два алгоритма, которые повышают эффективность зарядки суперконденсаторов в источниках питания аккумулирующих энергию от возобновляемых источников энергии, в частности, энергию Солнца и ветра. Первый алгоритм представляет разработанный способ по поиску точки максимальной мощности (MPPT) и второй алгоритм обеспечивает эффективный механизм переключения зарядки суперконденсаторов, когда один из суперконденсаторов полностью зарядился, а второй еще нет. Данная статья организована следующим образом: во втором разделе рассматриваются методы оптимизации сбора солнечной энергии. Третий раздел демонстрирует примеры в этой области. Четвертый раздел

представляет разработанную энергоустановку на базе возобновляемых источников энергии для питания беспроводного датчика метана. Пятый раздел описывает разработанные алгоритмы, после которого идут выводы.

## 2. Методы оптимизации сбора энергии от солнечной панели

На рис. 1. иллюстрирована вольтамперная характеристика и кривая мощности солнечной панели. Из рисунка видно, что солнечная панель генерирует максимальную мощность при определенном значении напряжения и тока ( $U_{mp}$  и  $I_{mp}$ ). Методы, которые применяются в настоящее время для сбора солнечной энергии, стремятся найти точку максимальной мощности солнечной панели (Maximum Power Point Tracking – MPPT).

Таблица 1. Энергопотребление датчиков газа

Тип	Компания	Ток (мА)
ДТК-2 Каталитический датчик	НТЦ ИГД, Россия	165 мА
SGS-21XX Полупроводниковый Датчик	Дельта- Russia	66,5 мА
TGS2610 Полупроводниковый Датчик	FIGARO, Япония	93,3 мА
NAP-66A Каталитический датчик	Nemoto, Япония	120 мА
MQ-4 Полупроводниковый Датчик	Hanwei Electronics, Китай	250 мА
Инфракрасный датчик	Платформа представленная в [13]	Потребление тока датчика :125 мА, Потребление тока лампы: 115 мА

Существуют разные методы для оптимизации сбора энергии от солнечной панели.

Учитывая потребление энергии датчиков газа (таблица 1), и количество собираемой энергии от возобновляемых источников энергии (таблица 2), необходимо минимизировать энергопотребление схемы выполняющей функцию МРРТ.

Первый метод выражает линейную зависимость между напряжением при котором достигается максимальная мощность панели ( $V_{mpp}$ ) и напряжением холостого хода солнечной панели ( $V_{oc}$ ). Этот метод известен под названием “Fractional open circuit voltage (FOCV)” и его можно представить в виде  $V_{mpp} = K_1 V_{oc}$ . Второй метод основан на подобном принципе, однако, он выражает линейную зависимость между током, при котором генерируется максимальная мощность  $I_{mpp}$ , и током короткого замыкания панели  $I_{sc}$ . Этот метод называется “Fractional Short Circuit Current (FSCC)” и математически выражается как  $I_{mpp} = K_2 I_{sc}$ .

Таблица 2. Плотность мощности некоторых источников энергии в окружающей среде [7], [14], [15]

Источник энергии	Условие	Плотность мощности
Свет	наружный	7500 мкВт/ см <sup>2</sup>
Свет	внутренний	100 мкВт/ см <sup>2</sup>
Вибрация	1м/с <sup>2</sup>	100 мкВт/ см <sup>3</sup>
Радиочастота	GSM 900 МГц	0,1 мкВт / см <sup>2</sup>
Тепло	$\Delta T = 5^\circ\text{C}$	60мкВт/ см <sup>2</sup>
Ветер	Скорость ветра: 4,4 м/с, Тип ветрогенератора: 4 лопасти, диаметр: 6,3 см, Мощность: 7,8 мВт )	0,25 мВт/ см <sup>2</sup>

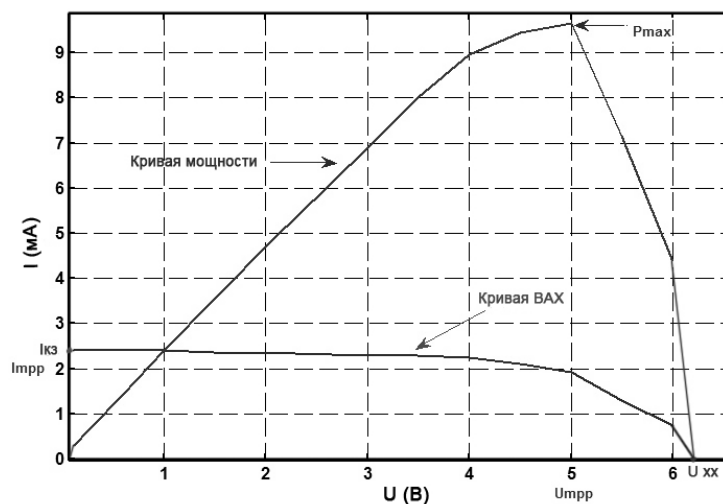


Рис. 1. Кривые мощности и ВАХ солнечной панели

$K_1$  и  $K_2$  являются константами и используются при вычислении значений оптимального напряжения и тока ( $V_{mpp}$  и  $I_{mpp}$ ) соответственно. Третий метод называется “возмущение и наблюдение – Perturb & Observation (P&O)”.

Логика этого метода заключается в периодическом “возмущении” рабочей точки солнечной панели путем изменения его напряжения с целью нахождения точки максимальной мощности. При таком методе, мощность солнечной панели сравнивается до и после каждого возмущения напряжения. В результате процесса возмущения напряжения, если мощность солнечной панели увеличивается тогда это означает, что рабочая точка панели продвигалась в сторону точки максимальной мощности и возмущение напряжения должно продолжаться по этому направлению. Уменьшение в значении мощности солнечной панели после проведения процесса возмущения напряжения означает, что рабочая точка панели отодвигалась от точки максимальной мощности.

### 3. Примеры исследований в области оптимизации сбора солнечной энергии

В работе, представленной в [16], разработан алгоритм нахождения точки максимальной мощности солнечной панели для задач беспроводных сенсорных сетей.

Указанный метод основан на принципе возмущения и наблюдения (P&O). Авторы сравнили работу системы с платформой использовавшей диод и в результате анализа наблюдалось, что система которая применяла алгоритмы оптимизации генерировала выходную мощность до уровня 1 мВт, однако, вторая платформа не могла обеспечить мощность ниже 10 мВт.

Работы [17], [18] и [19] используют метод FOCV для нахождения точки максимальной мощности. В работе [17] можно видеть, что для измерения напряжения холостого хода предназначена дополнительная солнечная панель, что и позволяет непрерывно отслеживать точку максимальной мощности.

Авторы в [20] поставили перед собой выбор двух методов: FOCV и FSCC. Для этого они измерили значения  $K_1$  и  $K_2$ . На основе результате сравнения наблюдалось, что диапазон изменений  $K_1$  лежит в интервале от 0,68 до 0,8 и для  $K_2$  это составляет от 0,25 до 0,68. Указанная работа применяет метод FOCV исходя из более узкого диапазона изменения  $K_1$  по сравнению с  $K_2$ . Для реализации метода была разработана схема которая периодически (через некоторые определенные интервалы времени) измеряла напряжение холостого хода солнечной панели и сохраняла его значение с целью корректировки напряжения оптимальной точки.

#### **4. Энергоустановка на базе возобновляемых источников энергии для питания беспроводного датчика метана**

Рисунок 2 иллюстрирует блок диаграмму разработанной энергоустановки, которая используется для питания беспроводного датчика метана. Данная платформа использует алгоритмы оптимизации сбора энергии от солнечной энергии. Блок сбора энергии содержит солнечную панель, ветрогенератор, два суперконденсатора (емкостью 400 Ф и напряжением 2,7 В) для накопления энергии Солнца и ветра, два DC – DC преобразователя тока, один DC-DC конвертер напряжения, литиевую батарею типа AA (напряжением 3,7 В, емкостью 3200 мАч) применяемую в качестве резервного питания, микроконтроллер МК ATXMTGA32A4 и мультиплексор.

В схеме источника питания, нагрузкой солнечной панели является суперконденсатор. Чтобы работать на точке максимальной мощности панели в процессе зарядки суперконденсатора, необходимо регулировать ток зарядки. Для этого применяется DC-DC преобразователь тока (рис. 2). Управление DC-DC преобразователей осуществляется контроллером источника питания. Энергия преобразования накапливается в индуктивных элементах и обеспечивается возможность выполнять понижение и повышение. Напряжение от суперконденсаторов и литиевой батарейки поступает в блок селектора источника питания где выбирается один из них для питания сенсорного модуля (рис. 2). Выбор также проводится контроллером источника питания который принимает решение на основе уровня напряжения на суперконденсаторах и батарее.



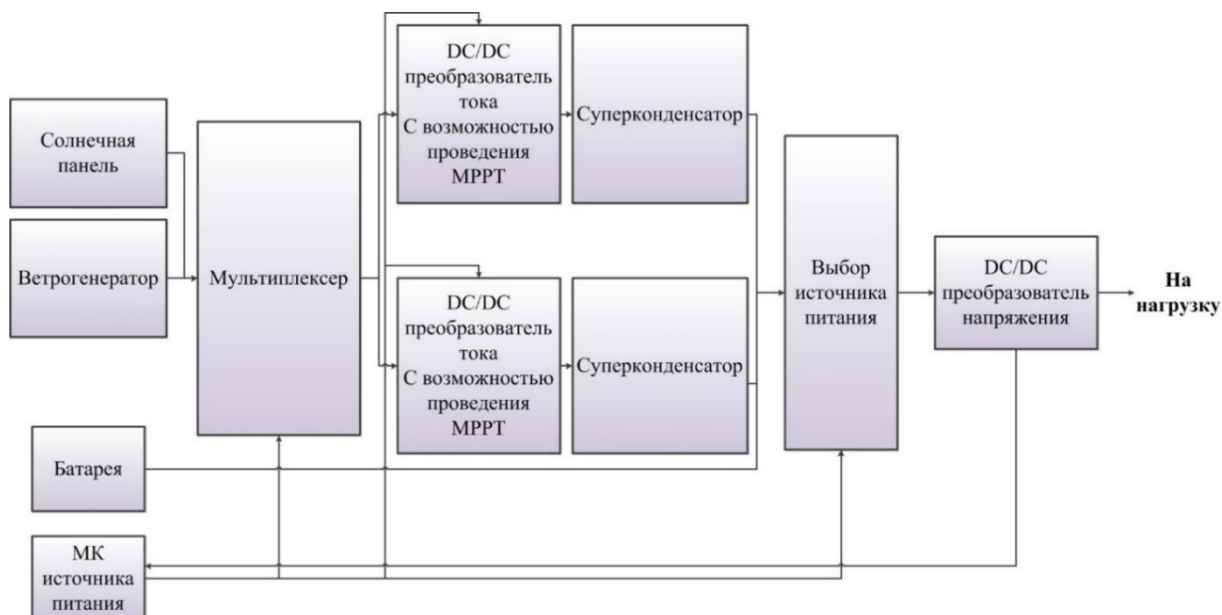


Рис. 2. Блок диаграмма энергоустановки на базе возобновляемых источников энергии

Если существует достаточный уровень напряжения на суперконденсаторах, выбирается тот который имеет самое высокое значение напряжения. В случае недостаточной энергии на суперконденсаторах, выбирается литиевая батарейка в качестве основного источника питания (рис. 3). Напряжение от выбранного источника питания подается в DC/DC преобразователь напряжения который преобразуется в необходимый уровень и питает сенсорную платформу и контроллер источника питания. Рисунок 4 демонстрирует внешний вид источника питания.

## 5. Разработанные алгоритмы по оптимизации сбора солнечной энергии и переключению зарядки суперконденсаторов

Упрощенный алгоритм для зарядки от солнечной панели представлен на рис. 5. По умолчанию зарядка суперконденсаторов от солнечной панели отключена и она включается только когда уровень напряжения на суперконденсаторе меньше максимального предела 2,7 В. Процесс зарядки от солнечной панели включает в

себя два режима: понижающий и повышающий. В обоих случаях используется DC/DC преобразователь тока. Это преобразование позволяет балансировать ток нагрузки солнечной панели и реализует механизм нахождения точки максимальной мощности. Указанное преобразование проводится с постоянным временем зарядки (т.е., включение) и разрядки (т.е., выключение) индуктивного элемента.

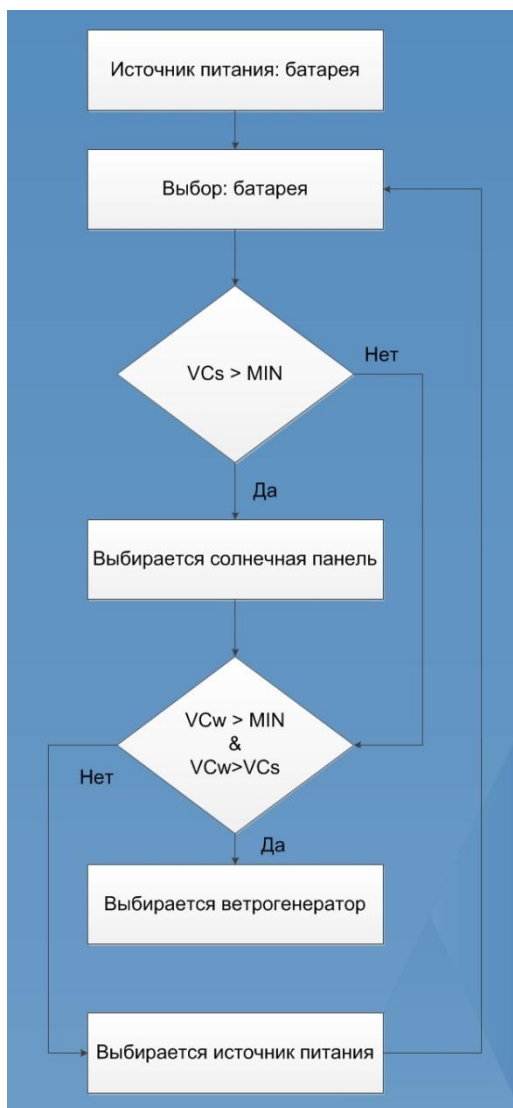


Рис. 3. Алгоритм выбора источника питания

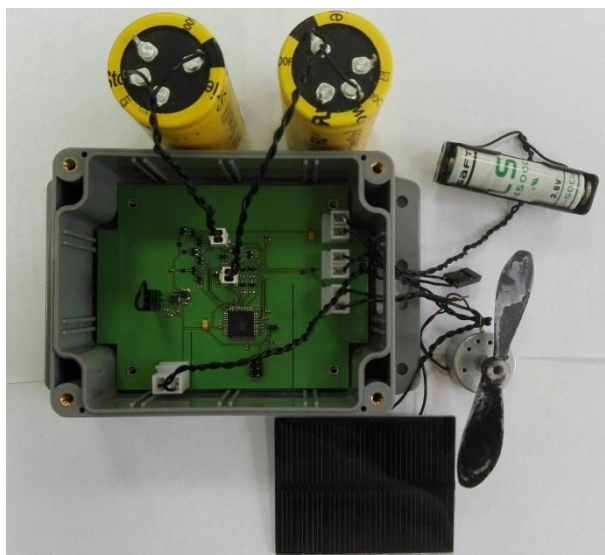


Рис. 4. Внешний вид экспериментального образца энергоустановки на базе возобновляемых источников энергии для питания беспроводного датчика газа

Понижающий режим выбирается когда напряжение суперконденсатора меньше чем выходное напряжение солнечной панели. В противном случае выбирается повышающий режим.

Когда переключается режим работы преобразователя, время разрядки индуктивного элемента сбрасывается на его максимальное значение. После этого, оно (время разрядки) управляется алгоритмом балансировки тока нагрузки.

Нахождение точки максимальной мощности солнечной панели осуществляется декрементным изменением времени разрядки индуктивного элемента и сравнением выходной мощности солнечной панели до и после этих изменений.

Если выходная мощность солнечной панели максимально время перестает уменьшаться. Перебалансировка тока нагрузки солнечной панели выполняется периодически путем сдвига времени разрядки индуктивного элемента на несколько

шагов и нахождения новой оптимальной точки. Каждый суперконденсатор соответствует определенному источнику питания: т.е., один используется для накопления ветровой энергии а другой для солнечной энергии. Если напряжение на суперконденсаторе накапливающем солнечную энергию, достиг максимальное значение или другими словами если он уже накопил достаточную энергию и уровень напряжения на суперконденсаторе от ветрогенератора меньше чем максимум и выходная мощность от ветрогенератора меньше чем выходная мощность солнечной панели, суперконденсатор от ветрогенератора переключается на зарядку от солнечной панели и ветрогенератор останавливает работу (рис.б)

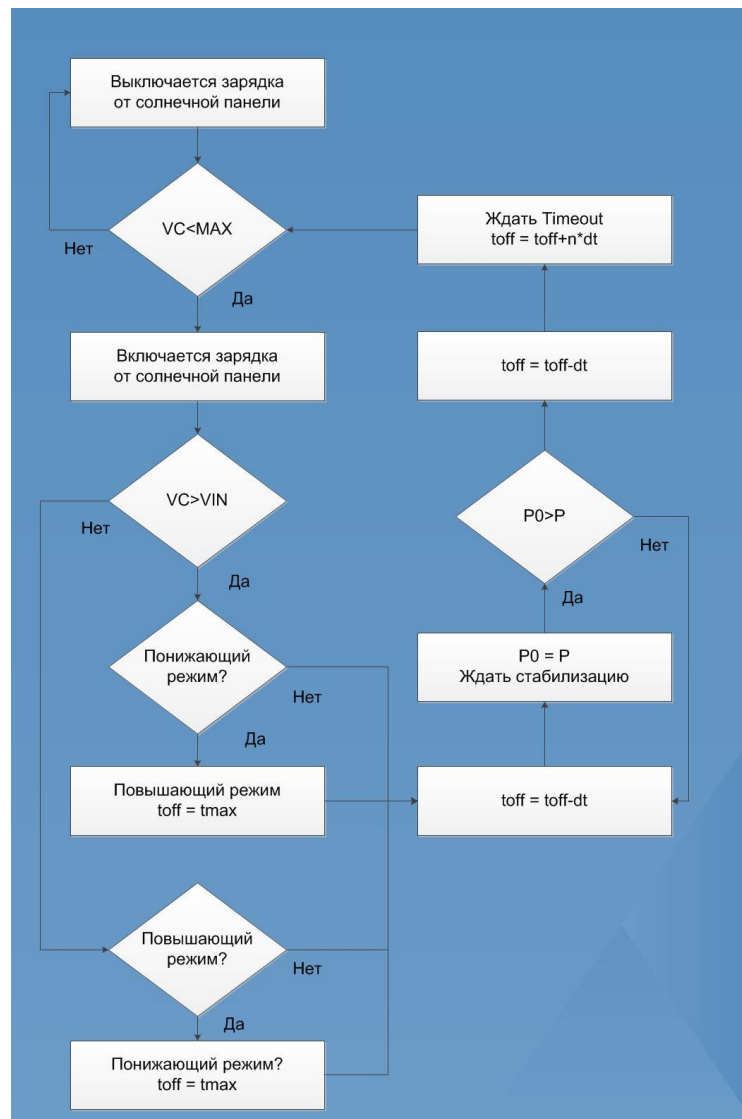


Рис. 5. Упрощенный алгоритм зарядки от солнечной панели

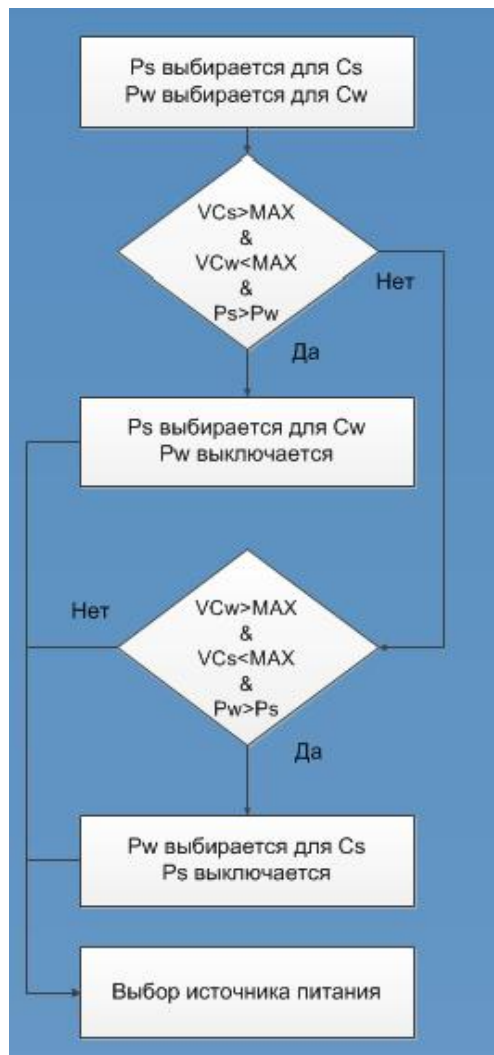


Рис. 6. Упрощенный алгоритм для выбора источника зарядки

Таким же образом если уровень напряжения на суперконденсаторе накапливающим ветровую энергию, больше чем максимум, напряжение суперконденсатора от солнечной панели меньше чем максимум и выходная мощность солнечной панели меньше чем та которая на выходе ветрогенератора, суперконденсатор от солнечной панели переключается на зарядку от ветрогенератора и питание от солнечной панели выключается (рис. 6).

## Выводы

1. В данной статье были рассмотрены три метода по оптимизации сбора солнечной энергии для питания беспроводных сенсорных систем. В первом методе (FOCV) напряжение при котором генерируется максимальная мощность имеет линейную зависимость от напряжения холостого хода солнечной панели. Во втором методе (FSCC) ток при котором генерируется максимальная мощность имеет линейную зависимость от тока короткого солнечной панели. Третий метод (P&O) основан на “возмущении” напряжения солнечной панели и наблюдении ее выходной мощности до и после каждого изменения. Если мощность панели увеличивается после каждой операции, это означает, что рабочая точка солнечной панели продвигалась в сторону точки максимальной мощности. При уменьшении мощности после каждого возмущения напряжения, это означает, что рабочая точка солнечной панели отодвигалась от точки максимальной мощности.

2. Учитывая потребление энергии датчиков газа (таблица 1) и количество собираемой энергии от возобновляемых источников энергии (таблица 2), необходимо минимизировать энергопотребление схемы выполняющей поиск точки максимальной мощности солнечной панели.

3. Алгоритм, разработанный для поиска точки максимальной мощности, выполняется путем декрементного изменения времени разрядки индуктивного элемента и сравнение выходной мощности солнечной панели до и после этих изменений. Время перестает уменьшаться, если выходная мощность солнечной панели максимально. Перебалансировка тока нагрузки солнечной панели

выполняется периодически путем сдвига времени разрядки индуктивного элемента на несколько шагов и нахождения новой оптимальной точки.

4. Предложен алгоритм, благодаря которому зарядку суперконденсатора, аккумулирующего энергию ветра, можно также проводить и от солнечной панели, если напряжение на суперконденсаторе, накапливающем солнечную энергию, достигло максимального значения.

### **Библиографический список**

1. Brunelli D., Rossi M. Enhancing lifetime of WSN for natural gas leakages detection // *Microelectronics Journal*. 2014. Vol. 45. No. 12, pp. 1665–1670.
2. Samotaev N.N., Vasiliev A.A., Podlepetsky B.I., Sokolov A.V., Pisljakov A.V. The mechanism of the formation of selective response of semiconductor gas sensor in mixture of CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/CO with air // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2007. Vol. 127. No. 1, pp. 242–247.
3. Somov A.S., Suchkov A., Karelin A., Mironov S., Baranov A.M., Karpova E. Compact Low Power Wireless Gas Sensor Node with Thermo Compensation for Ubiquitous Deployment // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2015. Vol. 11. No. 6, pp. 1660–1670.
4. Somov A.S., Baranov A.M., Spirjakin D.N., Passerone R., Circuit design and power consumption analysis of wireless gas sensor nodes: one-sensor versus two-sensor approach // *IEEE Sensors Journal*. 2014. Vol. 14. No.6, pp. 2056-2063.

5. Somov A.S., Baranov A.M., Suchkov A., Karelin A., Mironov S., Karpova E. Improving interoperability of catalytic sensors // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2015. Vol. 221, pp. 1156–1161.
6. Baranov A.M, Spirjakin D.N, Akbari S., Somov A.S. Passerone R. POCO: Perpetual operation of CO wireless sensor node with hybrid power supply // *Sensors & Actuators A: Physical*. 2016. Vol. 238, pp. 112-121.
7. Magno M., Boyle D., Brunelli D., O'Flynn B., Popovici E., Benini L. Extended Wireless Monitoring Through Intelligent Hybrid Energy Supply // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014. Vol. 61. No. 4, pp. 1871-1881.
8. Akbari S. Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks Review // *Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems 2014 (FedCSIS)*, Warsaw, Poland, 2014, pp. 987-992.
9. Акбари С., Баранов А.М., Спирякин Д.Н., Сомов А.С. Автономный беспроводной датчик угарного газа с питанием от альтернативных источников энергии // *Датчики и Системы*. 2016. №2. С. 48-53.
10. Baranov A.S., Spirjakin D.N., Akbari S., Somov A.C. Optimization of power consumption for gas sensor nodes: A survey // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2015. Vol. 233, pp. 279-289.
11. Weddell A.S., Merrett G.V., Al-Hashimi B.M. Photovoltaic Sample-and-Hold Circuit Enabling MPPT Indoors for Low-Power Systems // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2012. Vol. 59. No. 6, pp. 1196-1204.
12. Huynh D.C., Nguyen T.A.T., Dunnigan M.W., Mueller M.A. Maximum power point tracking of solar photovoltaic panels using advanced perturbation and observation



algorithm // Proceedings of the IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Melbourne, Australia, 2013, pp. 864-869.

13. Makeenkov A., Lapitskiy I., Somov A.C., Baranov A.M. Flammable gases and vapors of flammable liquids: Monitoring with infrared sensor node // Sensors and Actuators B: Chemical. 2015. Vol. 209, pp. 1102-1107.

14. Vullers R.J.M., van Schaijka R., Doms I., Van Hoof C., Mertens R. Micropower Energy Harvesting // Solid-State Electronics. 2009. Vol. 53. No. 7, pp. 684-693.

15. Ó Mathúna C., O'Donnell T., Martinez – Catala R.V., Rohan J., O'Flynn B. Energy Scavenging for Long – Term Deployable Wireless Sensor Networks // Talanta. 2008. Vol. 75. No. 3, pp. 613-623.

16. Alippi C., Galperti C. An Adaptive System for Optimal Solar Energy Harvesting in Wireless Sensor Network Nodes // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2008. Vol. 55. No. 6, pp. 1742-1750.

17. Brunelli D., Moser C., Thiele L., Benini L. Design of a Solar-Harvesting Circuit for Batteryless Embedded Systems // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2009. Vol. 56. No. 11, pp. 2519-2528.

18. Yu H., Yue Q. Indoor Light Energy Harvesting System for Energy-aware Wireless Sensor Node // Energy Procedia (Proceedings of the International Conference on Future Energy, Environment, and Materials). 2012. Vol. 16. Part B, pp. 1027-1032.

19. Varley J., Martino M., Poshtkouhi S., Trescases O. Battery and Ultra-Capacitor Hybrid Energy Storage System and Power Management Scheme for Solar-Powered Wireless Sensor Nodes // Proceedings of the 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, Quebec, Canada. 2012, pp. 4806-4811.

20. Simjee F.I., Chou P.H. Efficient Charging of Supercapacitors for Extended Lifetime of Wireless Sensor Nodes // IEEE Transactions on Power Electronics. 2008. Vol. 23. No. 3, pp. 1526-1536.

21. Галкин В.В. Солнечные и аккумуляторные батареи ОАО «Сатурн» на космических аппаратах с электронными двигателями // Труды МАИ. 2012. № 60.

URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35383>