

Specific Features of Selecting the Power Supply System Parameters for a Space Vehicle Operating in Very Low Orbits

MIKHEYEV Oleg V. (A Design Bureau «Salyut» of the State Space Scientific Production Centre Khrunichev (DB «Salyut», SSSPCKh), Moscow, Russia) – Head of the Division

POLOZHENTSEV Aleksandr Ye. (DB «Salyut», SSSPCKh, Moscow, Russia) – Head of the Department

BELIK Sergei V. (DB «Salyut», SSSPCKh, Moscow, Russia) – Deputy Head of the Department

OSHKIN Aleksei Ye. (DB «Salyut», SSSPCKh, Moscow, Russia) – Head of the Department

KURNYKOV Andrei G. (DB «Salyut», SSSPCKh, Moscow, Russia) – Deputy Head of the Department

The article considers the results from simulation and assessment of the design parameters of photovoltaic arrays and storage batteries used in the power supply system of very low-orbit space vehicles (SVs) operating in orbits at heights of 180–200 km that use low-thrust electric jet engines activated in each orbit pass of the SV flight. The main calculation formulas and a procedure for selecting the main parameters of the solar power system's photovoltaic array and storage battery are determined, and the results from assessing these parameters are given as applied to the typical orbit pass of a very low-orbit Earth remote sensing space vehicle. The obtained results can be used in substantiating the characteristics and designing the equipment of power supply systems for very low-orbit SVs of different sizes.

Key words: power supply system, space vehicle, electric jet engines, photovoltaic array, storage battery, correcting pulse

REFERENCES

1. Bakhvalov Yu. O., Khatulev V.A., Mikheyev O.V., Polozhentsev A.E., Belik S.V. *Polet – in Russ (Flight)*, 2015, No. 1, pp. 17–21.

2. Ikshe F.Yu., Mikheyev O.V., Sudakov V.M. *Elektrika – in Russ. (Electrica)*, 2010, No. 10, pp. 13–15.

3. Davydov A.A., Ikshe F.Yu., Mikheyev O.V., Sudakov V.M. *Polet – in Russ. (Flight)*, 2012, iss. 3, pp. 87–90.

[04.10.2017]

* * *

Гибридная система децентрализованного электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии разных видов

АНТОНОВ Б.М., БАРАНОВ Н.Н., КРЮКОВ К.В., РОЗАНОВ Ю.К.

Представлены результаты решения актуальной задачи анализа и разработки принципов создания энергетических комплексов на основе возобновляемых источников энергии. Такие комплексы включают в себя ветроэнергетическую установку, фотоэлектрический генератор, а также (в качестве резервной) дизель-генераторную установку. Мощность рассматриваемого гибридного энергокомплекса составляет от 1 до 100 кВт. Этот диапазон наиболее востребован для массовых (распределённых) потребителей электроэнергии. Исследования проводятся для решения ряда электротехнических проблем с целью обеспечения электромагнитной совместимости и устойчивой совместной работы основных элементов автономного блока энергоснабжения (возобновляемых источников энергии разных типов, дизель-генераторной установки, преобразователей постоянного тока, инверторов, аккумуляторной батареи и др.).

К л ю ч е в ы е с л о в а: система электроснабжения, возобновляемые источники электроэнергии, фотоэлектрические генераторы, ветроэнергетические установки

Согласование фотоэлектрического генератора и возобновляемых источников энергии с нагрузкой переменного тока. При подсоединении фотоэлектри-

ческого генератора (ФЭГ) к сети переменного тока особое внимание должно уделяться качеству электрической энергии, защите от сверхтоков и перена-

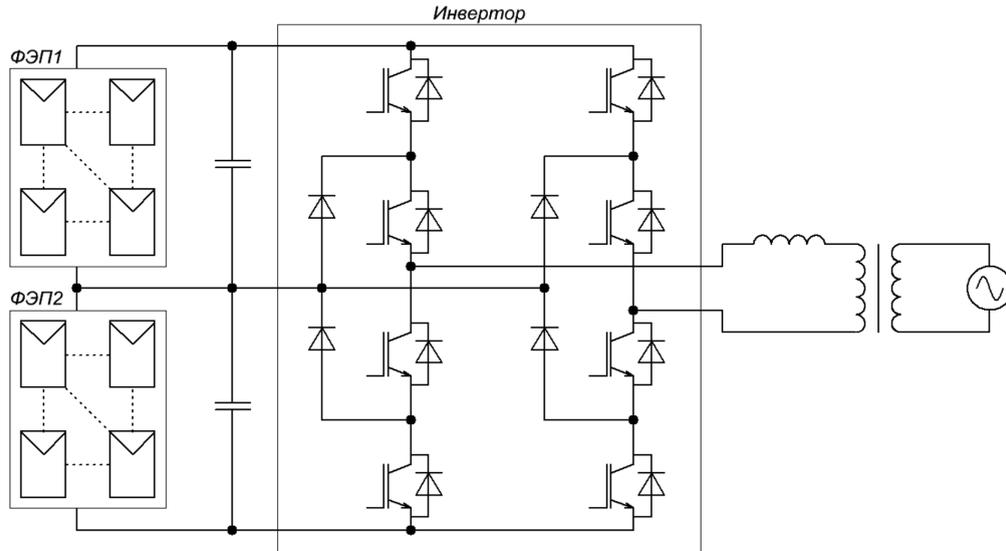


Рис. 1. Схема подключения ФЭП

пряжений, а также синхронизации работы ФЭГ и сети. Предпочтительной на сегодняшний день является схема (рис. 1) [1]. Схематехника исполнения и принципы её работы обеспечивают хороший гармонический состав выходного напряжения за счёт использования двухуровневого инвертора, при этом полупроводниковые приборы работают в менее «напряженных» условиях. Индуктивность на выходе преобразователя постоянного/переменного тока необходима как фильтр высоких частот.

Характер электромагнитных процессов при согласовании работы ФЭГ с сетью показан на диаграммах рис. 2. Инверторы, работающие от ФЭГ, синхронизируются с сетью таким образом, что фазы тока и напряжения должны совпадать даже при искажении напряжения сети. При искажении сетевого напряжения U_{grid} система синхронизации выделяет в пульсирующем сигнале только синусои-

дальнюю составляющую U_{grid1+} , которая используется для задания опорного напряжения, по которому формируется сигнал тока инвертора, чтобы гарантировать совпадение по фазе тока на выходе инвертора с напряжением сети. Таким образом, возможно управление передаваемой активной мощностью, равный единице. Из рис. 2 видно, что ток от инвертора в сеть имеет синусоидальную форму (это позволяет корректировать форму напряжения сети), а его фаза обеспечивает высокий коэффициент мощности [2]. При работе блока энергопитания, помимо обеспечения синхронизации ФЭГ и сети, необходимо реализовывать функции защиты блока энергопитания (БЭП) по максимальному и минимальному напряжению и частоте. Если напряжение или частота сети выходят за границы этих значений, то необходимо отключить питание сети от ФЭГ.

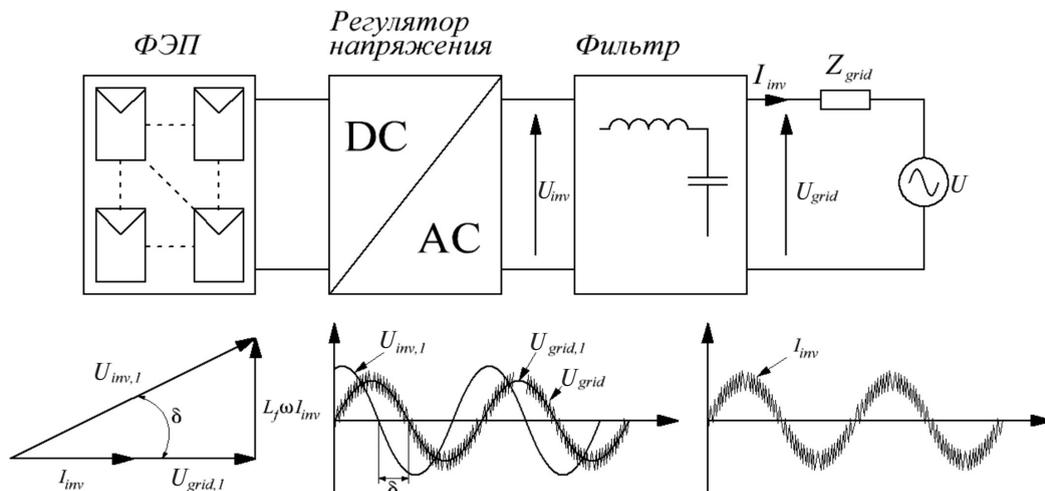


Рис. 2. Пример синхронизации инвертора

При выборе ветроэнергетической установки (ВЭУ) важной задачей является ограничение механической мощности при высоких скоростях ветра. Это достигается посредством аэродинамической конфигурации лопастей ветроколеса, обеспечивающей «срыв» потока при высоких скоростях ветра. Возможно также управление углом поворота лопастей ветроколеса при скорости ветра, превышающей критическое значение.

Для систем с фиксированной частотой вращения ротора предпочтительной является система с многополюсной синхронной машиной с постоянными магнитами (рис. 3) [3, 4].

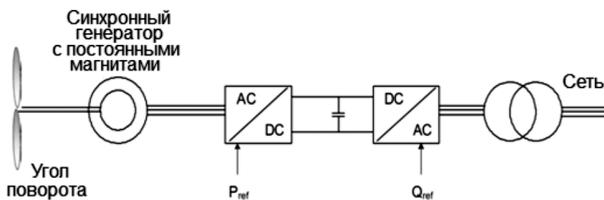


Рис. 3. Система с ВЭУ и синхронным генератором с постоянными магнитами

Рассмотрим основные элементы схемы гибридного энергетического комплекса на базе ВЭУ и дизель-генераторной установки (ДГУ) (рис. 4,а) [5]. Обе установки работают при переменной частоте вращения и, соответственно, переменной генерируемой мощности. Для ВЭУ это позволяет реализовать режим максимального использования энергии ветра, для ДГУ – снизить частоту вращения агрегата с уменьшением генерируемой мощности, что позволяет уменьшить расход органического топлива.

Для дальнейшего сокращения времени работы ДГУ в состав данного гибридного энергокомплекса включаются фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) (рис. 4,б).

Для повышения выработки электроэнергии от ФЭП в солнечной батарее каждый модуль ФЭП может быть соединен с собственным регулятором постоянного тока, которые совместно с активными выпрямителями B_1 и B_2 будут формировать шину постоянного тока (рис. 4,б).

Условием оптимального функционирования гибридного энергокомплекса (рис. 4,б), в состав которого входят ветроэнер-

гетическая, фотоэлектрическая и дизель-генераторная установки, является следующее: для электроснабжения нагрузки переменного тока должны использоваться, в первую очередь, ветроэнергетическая установка и фотоэлектрические преобразователи; при отсутствии энергии от ВЭУ и ФЭП питание нагрузки переходит на ДГУ.

Энергия, генерируемая ФЭП, может быть рассчитана как

$$W_{\text{ФЭП}} = S_{\text{ФЭП}} W_{\text{сол}} \eta_{\text{ФЭП}} \eta_{\text{пр}},$$

где $S_{\text{ФЭП}}$ – площадь ФЭП; $W_{\text{сол}}$ – энергия солнечного излучения; $\eta_{\text{ФЭП}}$ – к.п.д. модуля ФЭП; $\eta_{\text{пр}}$ – к.п.д. преобразователей системы.

Зависимость к.п.д. модуля ФЭП от температуры окружающей среды

$$\eta_{\text{ФЭП}} = \eta_{\text{ФЭПпас}} (1 - \beta W_{\text{сол}} T_{\text{окр.пас}} / 800).$$

Энергия ВЭУ напрямую зависит от скорости ветра. Энергетическая характеристика ВЭУ [6]:

$$P_{\text{ВЭУ}} = 0,5 \rho_{\text{воз}} R \pi V^3,$$

а энергия, выработанная ВЭУ:

$$W_{\text{ВЭУ}} = 24 P_{\text{ВЭУ}} \eta_{\text{ВЭУ}},$$

где V – скорость ветра; $\rho_{\text{воз}}$ – плотность воздуха; R – радиус ветроколеса; $\eta_{\text{ВЭУ}}$ – к.п.д. ВЭУ.

Энергия, выработанная ДГУ, определяется следующим образом:

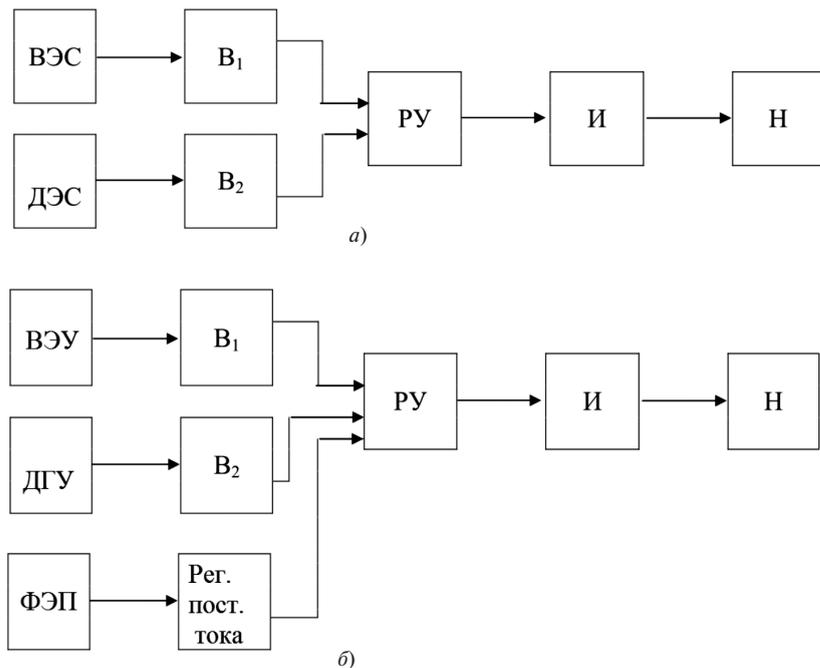


Рис. 4. Схема гибридного энергетического комплекса: а – на базе ВЭУ и ДГУ; б – на базе ВЭУ, ФЭП и ДГУ

$$W_{\text{ДГУ}} = P_{\text{ДГУном}} T_{\text{раб}},$$

где $P_{\text{ДГУном}}$ – номинальная мощность ДГУ;
 $T_{\text{раб}}$ – время работы ДГУ.

Для определения параметров блока энергоснабжения (БЭП) воспользуемся методическими указаниями [6]. Расчет параметров БЭП проводится в три этапа. На первом этапе должны быть получены спецификации всех источников, такие как к.п.д., площадь ФЭП, график нагрузки и метеорологические данные (скорость ветра, интенсивность солнечного излучения, температура окружающей среды). Затем необходимо задать значения мощности всех первичных энергоисточников и рассчитать значения энергии, генерируемой каждым из них (используя приведенные ранее модели). После этого необходимо вычислить разность значения генерируемой энергии всеми источниками за заданный интервал времени и значения энергии, требуемого нагрузке:

$$\Delta W = \sum_1^{8760} (W_{\text{ист}} - W_{\text{наг}}).$$

Значение ΔW может быть как больше, так и меньше нуля. Если $\Delta W > 0$, то система генерирует избыточную энергию и для ее запасания необходимо использовать аккумуляторные батареи (АБ). Если $\Delta W < 0$, то в системе существует дефицит электроэнергии и для покрытия дефицита необходимо увеличивать ёмкость аккумуляторных батарей.

Энергия, запасаемая в аккумуляторных батареях:

$$W_{\text{АБ}}(t) = \begin{cases} W_{\text{АБ}}(t-1)\eta_{\text{пр}}\eta_{\text{раз}}\eta_{\text{прв}} - W_{\text{наг}}(t), & \text{если } \Delta W < 0; \\ W_{\text{АБ}}(t-1)\eta_{\text{зар}} + W_{\text{ген}}(t), & \text{если } \Delta W > 0; \\ W_{\text{АБ}}(t-1), & \text{если } \Delta W = 0. \end{cases}$$

Ёмкость батареи с учетом избытка энергии

$$W_{\text{АБ}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{8760} \Delta W_{\text{изб}i} \eta_{\text{зар}}}{U_{\text{АБ}}},$$

где $\eta_{\text{зар}}$ – эффективность заряда АБ; $U_{\text{АБ}}$ – напряжение на АБ.

Для обобщения параметров расчета определяются следующие коэффициенты:

$$K_{\text{ФЭП}} = \frac{W_{\text{ФЭПсут}}}{W_{\text{наг.сут}}}; \quad K_{\text{ВЭУ}} = \frac{W_{\text{ВЭУсут}}}{W_{\text{наг.сут}}};$$

$$K_{\text{ДГУ}} = \frac{W_{\text{ДГУсут}}}{W_{\text{наг.сут}}}; \quad K_{\text{АБ}} = \frac{W_{\text{АБсут}}}{W_{\text{наг.сут}}}.$$

Данные коэффициенты используются при моделировании системы для определения коэффициента технического использования системы. На этом этапе рассчитывается полная мощность, генерируемая ФЭП и ВЭУ. Затем определяется энергетический баланс – разность генерируемой мощности и мощности нагрузки. Далее, если энергетический баланс отрицательный (т.е. генерируемой мощности недостаточно для покрытия потребности нагрузки), определяется степень заряда АБ и возможность полного покрытия дефицита энергии за счет питания нагрузки от АБ. В случае, если степень заряда АБ больше заданного минимального значения, то аккумулятор может покрыть потребность нагрузки. Если же степень заряда АБ меньше или равна минимальному значению, то для покрытия дефицита мощности нагрузки и дозаряда АБ необходимо использовать ДГУ. Когда энергии, запасенной в АБ, и энергии на выходе ДГУ недостаточно, результирующая разница значений энергии называется «энергодефицитом».

Такая процедура проводится для каждого почасового профиля нагрузки в течение года. Затем рассчитывается общее значение генерируемой за год энергии и «энергодефицита». После чего определяется вероятность внезапного отключения нагрузки:

$$C_{\text{отк}} = \frac{\sum_i^{366} \Delta W_{\text{деф.сут}}}{\sum_i^{366} \Delta W_{\text{наг.сут}}}.$$

Эти расчеты проводятся для всех значений заданных комбинаций параметров первичных источников. По результатам расчетов определяется массив комбинаций параметров источников со значениями вероятности внезапного отключения нагрузки.

На следующем этапе необходимо выделить конфигурацию системы с наименьшей вероятностью отключения нагрузки и среди них выбрать системы с минимальной мощностью ДГУ (минимальным временем работы ДГУ).

С использованием компьютерной модели гибридного энергетического комплекса в программном комплексе «Matlab Simulink» определялась возможность параллельной работы на общую нагрузку первичных источников энергии при ограниченной мощности каждого из них. Полученные результаты подтвердили эффективность схемотехнических принципов и требуемое качество электромагнитных процессов при функционировании разрабатываемого энергетического комплекса в заданных режимах работы. Анализ результатов моделирования

показывает, что в разработанном комплексе питание нагрузки осуществляется как от ВЭУ, так и от ФЭУ, а избыток генерируемой мощности запасается в аккумуляторной батарее. Таким образом, при дефиците энергии отдельных видов ВИЭ с использованием системы управления можно распределять суммарную имеющуюся энергию (от ВЭУ и ФЭП) для питания нагрузки и зарядки аккумулятора.

Вывод. Исследование совместной работы первичных источников энергии на общую нагрузку переменного тока показало, что при ограниченной мощности каждого из типов ВИЭ (ФЭП и ВЭУ) возможно суммировать их мощность для обеспечения требуемой мощности нагрузки с одновременной зарядкой аккумуляторной батареи (или при минимальном расходе энергии аккумулятора).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Romero-Cadaval E., Spagnuolo G., Garcia Franquelo L., Ramos-Paja C.A., Suntio T., Xiao W.M. Grid-Connected Photovoltaic Generation Plants: Components and Operation. — IEEE Industrial Electronics Magazine, 2013, vol. 7, No. 3.
2. Kryukov K.V. and Valiev M.M. Residential photovoltaic power conditioning system with module integrated DC-DC converters. — 15th Intern. Power Electronics and Motion Control Conf., Novi Sad, 2012, pp. DS3b.9-1—DS3b.9-4.
3. Blaabjerg F. and Ma K. Future on Power Electronics for Wind Turbine Systems. — IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Sept. 2013, vol. 1, No. 3, pp. 139—152.
4. H. Polinder, F.F. A. van der Pijl, G.J. de Vilder and P.J. Tavner. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines. — IEEE Trans. on Energy Conversion, Sept. 2006, vol. 21, No. 3, pp. 725—733.

5. Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении. — М.: Энергоатомиздат, 2008, 231 с

6. A. Mohamed, T. Khatib. Optimal Sizing of a PV/Wind/Diesel Hybrid Energy System for Malaysia, ICIT, 2013, pp. 752—757.

[25.10.2017]

А в т о р ы: **Антонов Борис Михайлович** окончил факультет электрического транспорта Московского института инженеров транспорта в 1957 г. В 1992 г. защитил в Московском энергетическом институте (МЭИ) — ныне Национальный исследовательский университет «МЭИ» — «НИУ «МЭИ») докторскую диссертацию «Система нагружения и преобразования электрической энергии МГД генератора». Ведущий научный сотрудник Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Баранов Николай Николаевич окончил теплоэнергетический факультет МЭИ в 1969 г. В 1995 г. защитил докторскую диссертацию «Разработка вопросов повышения надежности и ресурса нетрадиционных установок прямого преобразования энергии и анализ перспектив их практического применения». Профессор, главный научный сотрудник ОИВТ РАН.

Крюков Константин Викторович окончил Институт электротехники МЭИ в 2006 г. Старший преподаватель кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты» «НИУ «МЭИ».

Розанов Юрий Константинович окончил электро-механический факультет МЭИ в 1962 г. В 1987 г. защитил докторскую диссертацию в МЭИ. Профессор кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты» «НИУ «МЭИ».

Elektrichestvo (Electricity), 2018, No. 1, pp. 8–13

DOI:10.24160/0013-5380-2018-1-8-13

A Hybrid Decentralized Power Supply System Based on Different Kinds of Renewable Energy Sources

ANTONOV Boris M. (*Joint Institut for High Temperature of Russian Academy of Sciences (JIHT RAS, Moscow, Russia)*) — *Leading Scientific Researcher, Dr. Sci. (Eng.)*

BARANOV Nikolai N. (*JIHT RAS, Moscow, Russia*) — *Chief Scientific Researcher, Dr. Sci. (Eng.)*

KRYUKOV Konstantin V. (*National Research University «Moscow Power Engineering Institute» («NRU «MPEI», Russia)*) — *Senior Lecturer*

ROZANOV Yuri K. (*«NRU «MPEI», Russia*) — *Professor, Dr. Sci. (Eng.)*

The article presents the results from solving a topical problem of analyzing and elaborating principles for constructing power systems based on renewable sources of energy. Such systems include a windmill, a photovoltaic generator, and a diesel-generator plant (as a standby source of power supply). The capacity of the considered hybrid power system is from 1 to 100 kW. This range is of most demand for mass-scale (distributed) electricity consumers. The studies are carried out for solving a number of electrical engineering problems to ensure electromagnetic compatibility and stable joint operation of the self-contained power supply unit including different types of renewable energy sources, a diesel-generator plant, a DC converter, inverters, a storage battery, etc.

Key words: *power supply system, renewable sources of electric energy, photovoltaic generators, wind mills*

REFERENCES

1. **Romero-Cadaval E., Spagnuolo G., Garcia Franquelo L., Ramos-Paja C.A., Suntio T., Xiao W.M.** Grid-Connected Photovoltaic Generation Plants: Components and Operation. — IEEE Industrial Electronics Magazine, 2013, vol. 7, No. 3.
2. **Kryukov K.V. and Valiev M.M.** Residential photovoltaic power conditioning system with module integrated DC-DC converters. — Intern. Power Electronics and Motion Control Conf., Novi Sad, 2012, pp. DS3b.9-1—DS3b.9-4.
3. **Blaabjerg F. and Ma K.** Future on Power Electronics for Wind Turbine Systems. — IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Sept. 2013, vol. 1, No. 3, pp. 139—152.
4. **H. Polinder, F.F. A. van der Pijl, G.J. de Vilder and P.J. Tavner.** Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines. — IEEE Trans. on Energy Conversion, Sept. 2006, vol. 21, No. 3, pp. 725—733.
5. **Lukutin B.V., Surzhikova O.A., Shandarova Ye.B.** *Vozobnovlyayemaya energetika v detsentralizovannom elektrosnabzhenii* (Renewable energy in decentralized electricity supply). Moscow, Energoatomizdat, 2008, 231 p.
6. **A. Mohamed, T. Khatib.** Optimal Sizing of a PV/Wind/Diesel Hybrid Energy System for Malaysia, ICIT, 2013, pp. 752—757.

[25.10.2017]