

## Интеллектуальный фотоэлектрический модуль для распределенной энергетики

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

*Для гибридного энергокомплекса, содержащего возобновляемые источники энергии (ВИЭ) – ветроэнергетическую установку и фотоэлектрический генератор, а также (в качестве резервных) дизель-генераторную установку (ДГУ) и аккумулирующее устройство (накопитель электрической энергии), решается важная научно-практическая задача по разработке вариантов системы управления и алгоритмов автоматического регулирования первичными возобновляемыми источниками энергии с целью отбора максимально возможной мощности от ВИЭ и ограничения использования ДГУ в составе ГЭК. Полученные научные результаты ориентированы на решение практических задач, связанных с обеспечением бесперебойного электроснабжения распределённых потребителей в различных регионах РФ.*

*Ключевые слова: контроллер точки максимальной мощности, регулятор постоянного тока, фотоэлектрические системы, последовательное включение фотоэлектрических модулей, интеллектуальный фотоэлектрический модуль*

Примерно 2/3 территории нашей страны не охвачены сетями электропередач и находятся в зонах децентрализованной энергетики. Электроснабжение потребителей в этих зонах осуществляется в основном за счёт дизель-генераторных установок, работающих на привозном органическом топливе. Именно в таких регионах целесообразно построение современного энергообеспечения с привлечением местных топливных энергоресурсов и возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Для повышения эффективности региональной распределённой энергетики разрабатываются гибридные (комбинированные) энергокомплексы, в которых в качестве первичных используются возобновляемые источники энергии, а в качестве резервных – дизель-генераторы и аккумуляторы (накопители электрической энергии).

Среди различных видов ВИЭ наиболее перспективным в условиях нашей страны является совместное использование ветроэнергетических установок (ВЭУ) и фотоэлектрических генераторов (ФЭГ), поскольку во многих регионах солнечная энергия и энергия ветра дополняют друг друга. Использование в одном энергокомплексе ФЭГ и ВЭУ позволяет повысить надёжность и обеспечить непрерывность электроснабжения потребителей при различных внешних (погодных) факторах.

В [1–3] рассмотрены схемотехнические решения гибридного энергокомплекса (ГЭК), содержащего возобновляемые источники энергии – ветроэнергетическую установку и фотоэлектрический генератор, а также (в качестве резервных) дизель-генераторную установку (ДГУ) и аккумулирующее устройство (накопитель электрической энергии). Мощность проектируемого гибридного энергоком-

плекса составляет от 1 до 100 кВт. Этот диапазон наиболее востребован для распределённых индивидуальных потребителей электроэнергии.

В предлагаемой статье решается важная научно-практическая задача по разработке вариантов системы управления и алгоритмов автоматического регулирования первичными возобновляемыми источниками энергии с целью отбора максимально возможной мощности от ВИЭ и ограничения использования ДГУ в составе ГЭК.

Научные результаты, полученные в результате исследований, ориентированы на решение практических задач, связанных с обеспечением бесперебойного электроснабжения распределённых потребителей в различных регионах РФ.

**Основная часть.** Топология гибридного энергетического комплекса на базе фотоэлектрической, ветроэнергетической и дизель-генераторной установок представлена на рис. 1. Основные задачи системы управления ГЭК – уменьшение времени (и мощности) работы дизель-генераторной установки с целью экономии дорогого привозного дизельного топлива и увеличение времени работы (и выходной мощности) возобновляемых источников энергии (ВЭУ и ФЭУ).

Поставленные задачи частично могут быть решены за счёт того, что в составе комбинированной энергоустановки ВЭУ и ДГУ работают в режимах переменной частоты вращения и, соответственно, переменной генерируемой мощности. Для ВЭУ это позволяет реализовать режим максимального использования энергии ветра, для ДГУ – понизить частоту вращения агрегата с уменьшением необходимой генерируемой мощности, что позволяет уменьшить расход топлива.

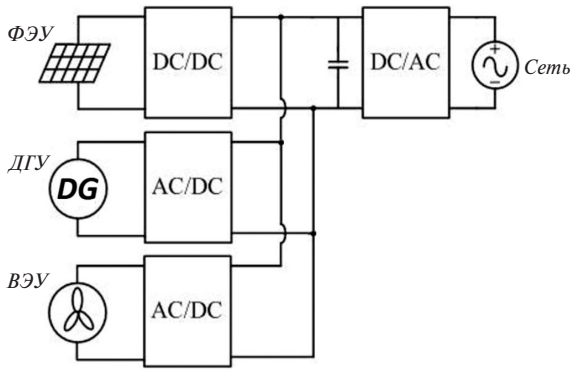


Рис. 1. Схема гибридного энергетического комплекса на базе ФЭУ, ВЭУ и ДГУ

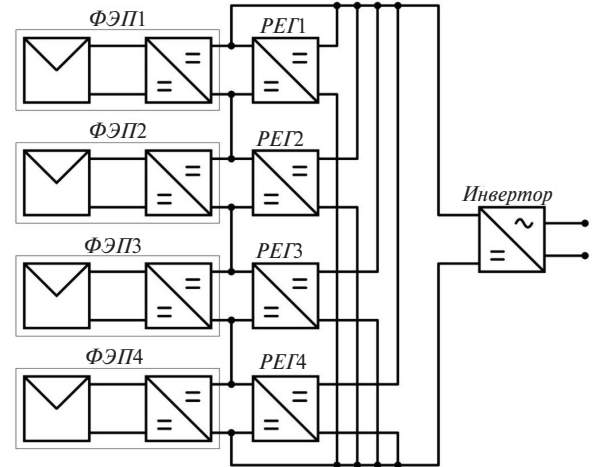


Рис. 2. Структура соединения модулей ФЭП

Для дальнейшего уменьшения времени электропитания нагрузки от ДГУ одновременно с ветроэнергостановкой может быть введено питание нагрузки от фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Основная задача системы управления ФЭП состоит в поддержании режима работы его модулей в режиме съема максимальной мощности при любых внешних условиях.

Сложность работы системы управления ФЭП заключается в том, что освещенность отдельных модулей солнечной батареи может существенно различаться даже при одинаковых внешних условиях. Решение этой проблемы рассмотрено в [4–7], предлагаются две авторские разработки: структура соединения интеллектуальных модулей ФЭП с реверсивными регуляторами; алгоритм управления реверсивными регуляторами.

Система управления режимами работы фотоэлектрических преобразователей (солнечных батарей). В [7] была предложена структура из последовательно соединенных интеллектуальных модулей ФЭП, представленная на рис. 2, в которой к выходу каждого модуля ФЭП подключен каскад из двух регуляторов постоянного тока. Напряжение, необходимое для работы на сеть переменного тока, формируется путем последовательного соединения первых регуляторов каскада на выходе модуля

ФЭП (рис. 2). При этом первый регулятор служит для отбора максимальной мощности от модуля ФЭП, второй, выполненный по схеме реверсивного регулятора, – для выравнивания значений напряжения на выходах последовательно включенных регуляторов первого каскада и поддержания работы интеллектуальных модулей ФЭП в точке максимальной мощности (ТММ). В статье более подробно рассматривается алгоритм управления реверсивными регуляторами постоянного тока.

Реверсивный регулятор на рис. 3 построен на базе повышающего преобразователя постоянного тока с двумя полностью управляемыми ключами. Энергия с выхода первого регулятора каскада в звено постоянного тока передается посредством ШИМ – регулирования импульсов управления ключом S1. При этом импульсы управления ключом S2 (MOSFET транзистор) отсутствуют, а протекание тока в индуктивности L1 в период выключенного состояния ключа S1 обеспечивается за счет встроенного в ключ S2 обратного диода. Энергия из звена постоянного тока на выход регулятора первого каскада передается посредством ШИМ – регулирования импульсов управления ключом S2.

Выравнивание значений выходных напряжений и поддержание работы в ТММ интеллектуальных

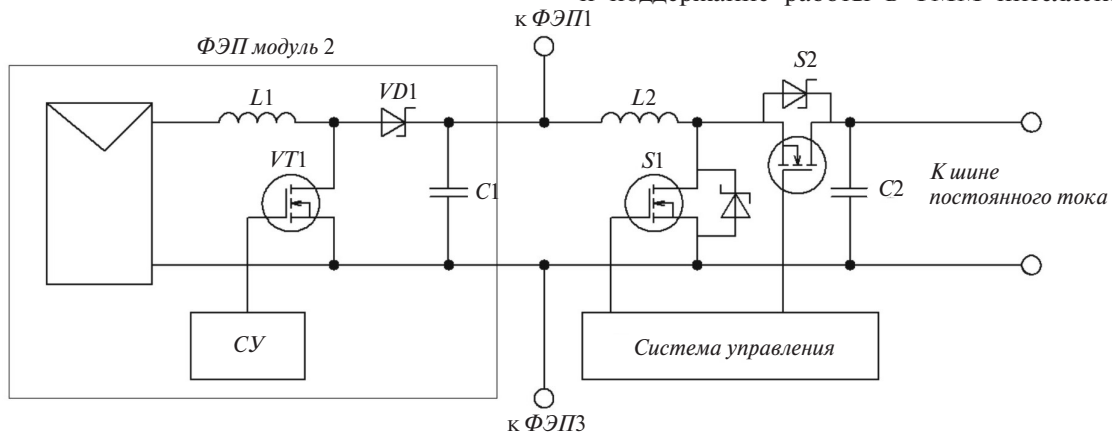


Рис. 3. Каскадное соединение регуляторов постоянного тока

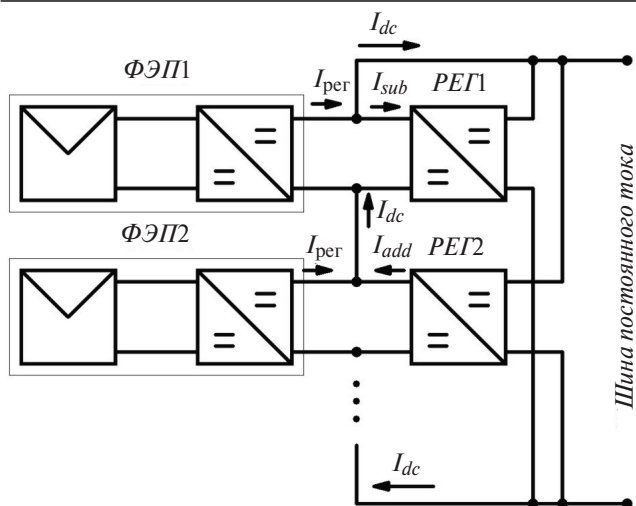


Рис. 4. Принцип выравнивания токов

модулей ФЭП осуществляется посредством управления токами в узлах соединения регуляторов каскада (рис. 4). Так, при снижении освещенности одного из модулей ФЭП система управления реверсивным регулятором должна сформировать ток  $I_{add}$  таким образом, чтобы соблюдалось равенство:

$$I_{dc} = I_{per} + I_{add}, \quad (1)$$

где  $I_{dc}$  – ток через последовательно включенные регуляторы постоянного тока;  $I_{per}$  – ток на выходе 1-го регулятора каскада. При этом выходное напряжение регулятора постоянного тока останется фактически неизменным, а все напряжения в цепочке последовательно включенных регуляторов будут распределены равномерно.

Если для заданного значения тока  $I_{per}$  добавочный ток  $I_{add}$  превышает максимально допустимое значение, то происходит снижение напряжения в звене постоянного тока до уровня, при котором будет выполняться условие (1). При этом выравнивающие регуляторы, подключенные к выходам модулей ФЭП с начальной освещенностью, должны будут формировать такой ток  $I_{sub}$ , чтобы в узлах

соединения регуляторов постоянного тока соблюдалось равенство:

$$I_{dc} = I_{per} + I_{sub}. \quad (2)$$

*Управление регулятором поиска точки максимальной мощности.* Алгоритм отслеживания точки максимальной мощности по методу возмущения и наблюдения [8] реализуется следующим образом (рис. 5). На вход системы управления поступают текущие значения выходного напряжения и мгновенной мощности модуля ФЭП. Значения этих параметров сравниваются со значениями, полученными на предыдущем периоде измерений с помощью блока *Memory*, вычисляются разности  $dU$  и  $dP$ , и система запоминает знак приращения. Далее в зависимости от знака произведения ( $dUdP$ ) формируется сигнал на приращение или уменьшение текущего коэффициента заполнения на значение величины  $dD$ . Согласно алгоритму, в случае положительного знака произведения следует убавить возмущение, в случае отрицательного – продолжить.

Следует отметить, что для корректной работы алгоритма необходимо выбирать частоту дискретизации входных величин, а также значение приращения  $dD$  таким образом, чтобы после каждого приращения коэффициента заполнения процесс изменения тока на выходе ФЭП переходил в установившийся режим. Блок *Trigger* определяет, с какой частотой будет обновляться коэффициент заполнения  $D$ , который изменяется дискретно.

*Управление реверсивным регулятором.* Система управления реверсивным регулятором (блок-схема на рис. 6) работает следующим образом. Напряжение с выхода интеллектуального модуля ФЭП подается на вход системы управления, где вычисляются разность  $dU$  текущего напряжения на выходе первого регулятора каскада и значения уставки по напряжению  $U_{ref}$ , рассчитанной из условия равномерного распределения напряжения между регуляторами постоянного тока в цепочке. Значение  $dU$  подается на вход блока регулирования, который

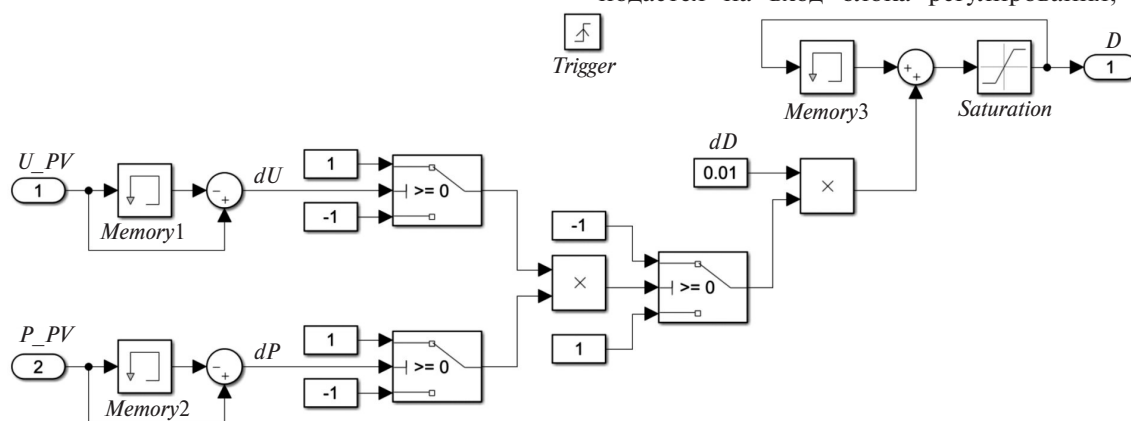


Рис. 5. Блок-схема алгоритма отслеживания точки максимальной мощности по методу возмущения и наблюдения в программном комплексе Matlab Simulink

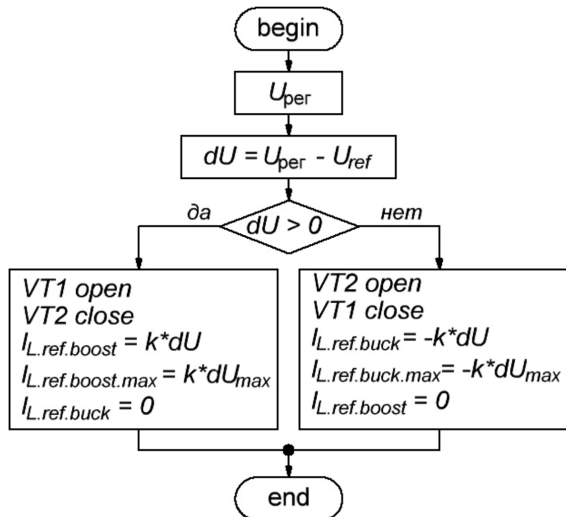


Рис. 6. Блок-схема системы управления реверсивным регулятором

имеет два канала управления. В случае, если значение разности  $dU$  положительное, формируются импульсы управления транзистором  $VT1$  (рис. 6), и управление осуществляется в режиме повышающего регулятора. При отрицательном значении  $dU$  формируются сигналы управления транзистором  $VT2$  и управление осуществляется в режиме понижающего регулятора.

На выходе каналов формируются опорные значения токов для ШИМ-сигналов, поступающих на ключи  $VT1$  и  $VT2$ . Значение разности напряжений  $dU$  преобразуется в значение опорного тока  $I_{L.ref}$ , протекающего через дроссель реверсивного регулятора (для разных режимов его работы).

Принимается, что ток  $I_{L.ref}$  изменяется прямо пропорционально разности напряжений  $dU$ :

$$I_{L.ref} = kdU, \tag{3}$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, численно равный коэффициенту заполнения  $\gamma$  для каждого режима регулятора.

Направление добавочных токов различно в двух случаях: освещен или затемнен модуль ФЭП. Пусть положительное направление добавочного тока считается от интеллектуального модуля ФЭП к нагрузке (модуль ФЭП освещен, реверсивный регулятор работает в режиме повышающего регулятора). В этом случае для корректной работы системы добавочный ток, формируемый реверсивным регулятором в режиме работы понижающего регулятора, следует умножить на  $(-1)$ , тем самым показывая, что добавочный ток в цепочке с затемненным модулем ФЭП направлен в другую сторону – от нагрузки к интеллектуальному модулю ФЭП.

Во время переходных процессов добавочные токи увеличиваются, поэтому следует их ограничить. Пусть максимальное отклонение выходного напряжения повышающего регулятора от заданного значения будет равно  $0,05\text{ В}$  ( $dU=0,05\text{ В}$ ). При этом в соответствии с (3) максимальное опорное значение тока  $I_{L.ref\max}$ , протекающего через дроссель реверсивного регулятора, составляет  $0,025\text{ А}$ .

**Полученные результаты моделирования и их анализ.** Рассмотрим результаты моделирования системы управления ГЭК в программном комплексе *Matlab Simulink*. Параметры исследуемых модулей ФЭП указаны в таблице. Все элементарные ячейки этих модулей соединены последовательно.

На рис. 7 представлены диаграммы освещенности модулей ФЭП и мощности, отбираемой от них.

При моделировании сначала освещался один модуль, другой был затемнен, затем ситуация менялась на противоположную. Как видно из диаграмм, в каждом случае системе удается отыскать точку максимальной мощности. Удалось также выровнять выходное напряжение повышающих регуляторов – оно поддерживается на уровне  $30\text{ В}$ .

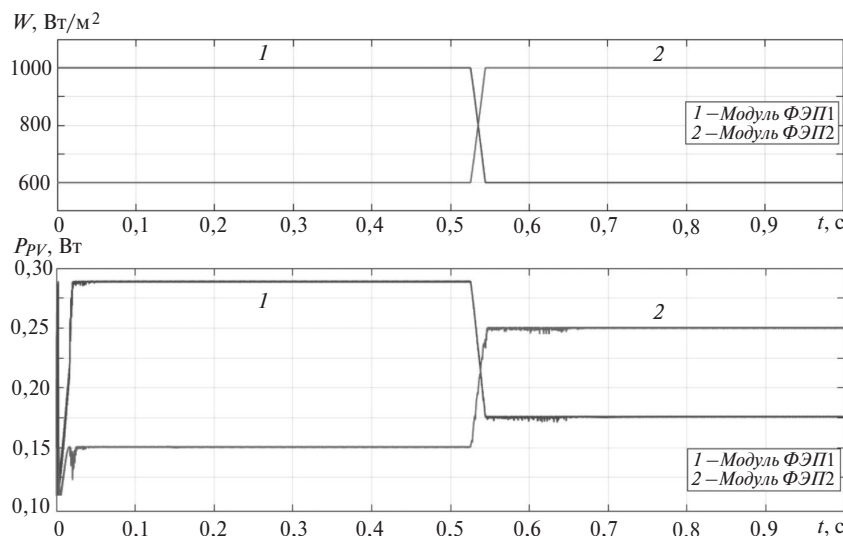


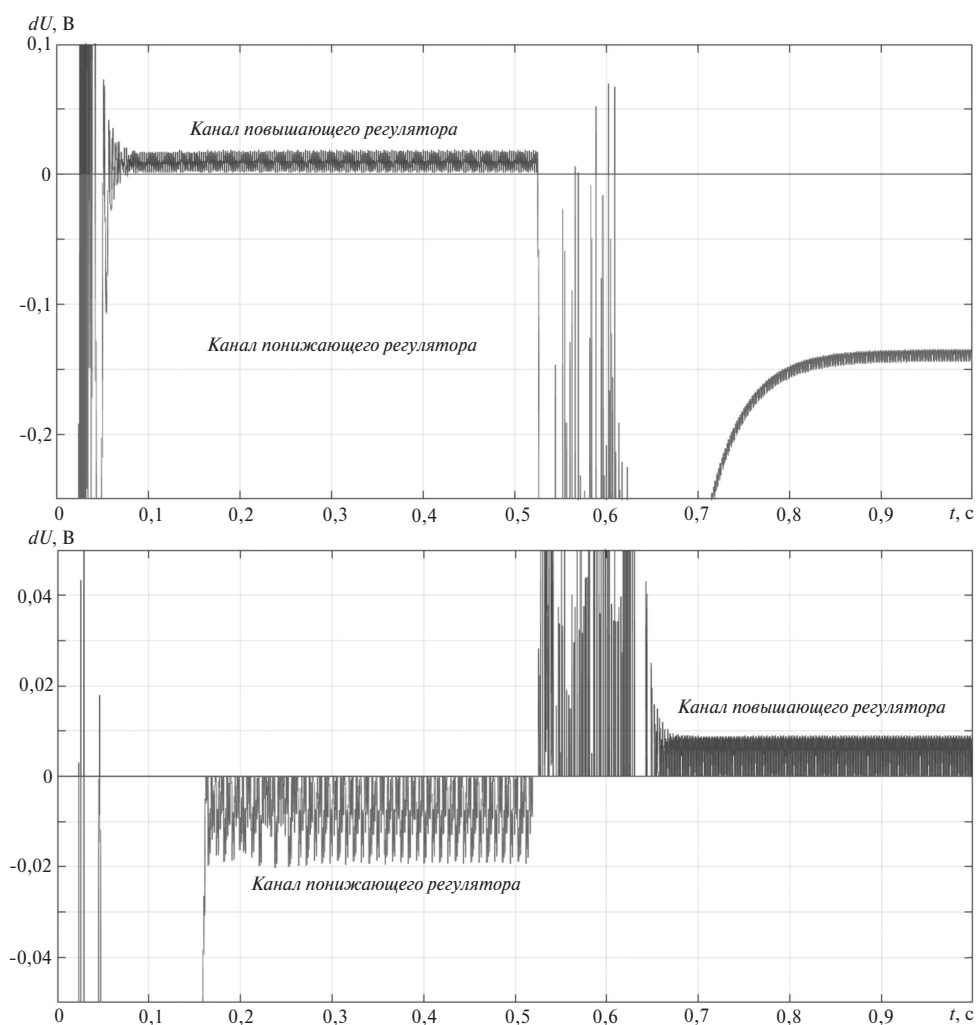
Рис. 7. Диаграммы освещенности  $W$  и мощности  $P_{pv}$ , отбираемой от интеллектуальных модулей ФЭП

Параметры	Модули			
	ФЭП 1		ФЭП 2	
Число ячеек	46		42	
Освещенность $W$ , Вт/м <sup>2</sup>	1000	600	1000	600
Ток короткого замыкания $I_{КЗ}$ , мА	21,2	12,5	19,3	12,17
Напряжение холостого хода $U_{ХХ}$ , В	20,5	19,8	18,5	18
Ток в точке максимальной мощности $I_{P_{max}}$ , мА	19,25	11,32	17,69	10,8
Напряжение в точке максимальной мощности $U_{P_{max}}$ , В	15,02	14,34	14,16	13,76
Максимальная мощность $P_{max}$ , мВт	289,1	162,3	250,5	148,6

В случае, когда ФЭП1 освещен максимально, а ФЭП2 – минимально, выходные напряжения повышающих регуляторов в установившемся режиме практически равны. Это говорит о том, что реверсивный регулятор, последовательно подключенный к ФЭП1, полностью компенсирует провал выходного напряжения повышающего регулятора, подключенного последовательно с ФЭП2.

В противоположной ситуации в установившемся режиме выходное напряжение на встроенном в модуль ФЭП2 регуляторе равно значению уставки

по напряжению  $U_{ref}$  (30 В), а выходное напряжение на встроенном в модуль ФЭП1 регуляторе ниже 30 В. Это можно объяснить тем, что реверсивный регулятор, последовательно подключенный к ФЭП2, не может до конца восполнить провал выходного напряжения повышающего регулятора, встроенного в модуль ФЭП1, поскольку максимально отбираемая мощность у ФЭП2 меньше, чем у ФЭП1 при одной и той же освещенности (см. табл., рис. 7).



**Рис. 8.** Разность  $dU$  текущего напряжения на выходе повышающего регулятора каскада и значения уставки по напряжению  $U_{ref}$ : *a* – реверсивный регулятор подключен последовательно с интеллектуальным модулем ФЭП1; *б* – реверсивный регулятор подключен последовательно с интеллектуальным модулем ФЭП2



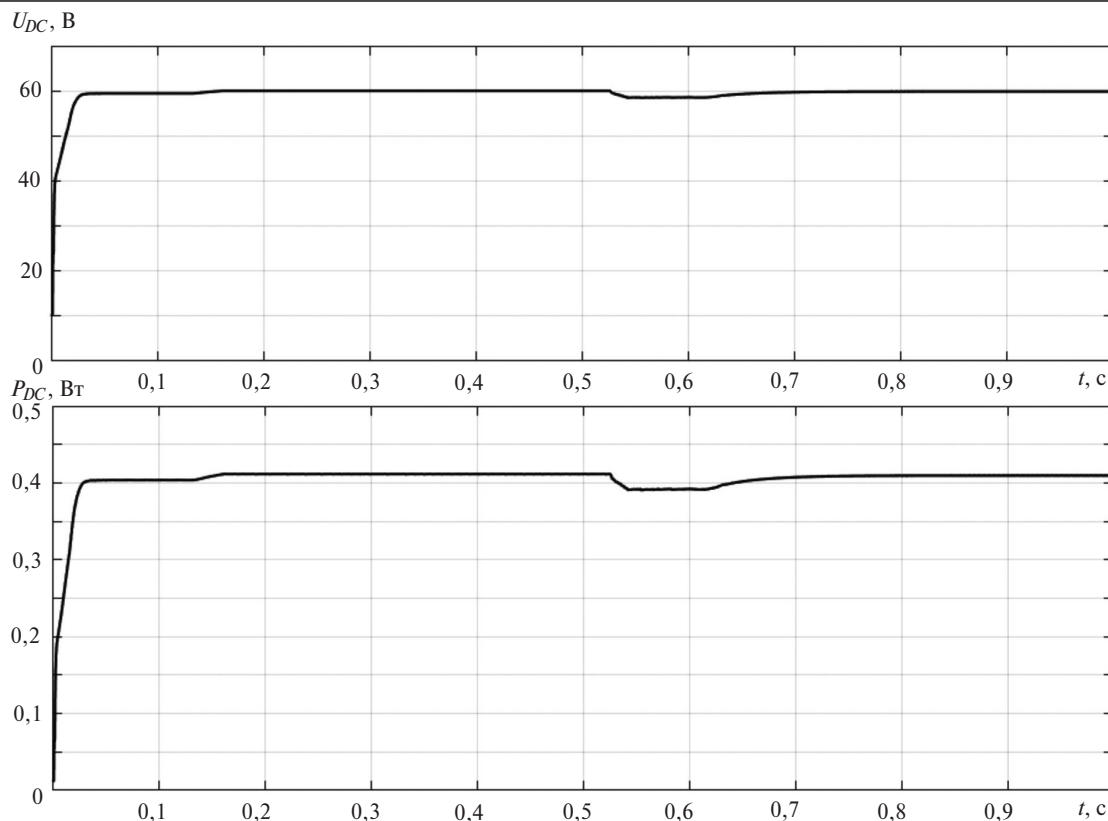


Рис. 9. Диаграммы напряжения на шине постоянного тока  $U_{DC}$  и суммарной мощности на шине постоянного тока  $P_{DC}$

Для того чтобы понять, в каком режиме работает реверсивный регулятор, нужно обратиться к диаграммам разности  $dU$  текущего напряжения на выходе первого регулятора каскада и значения уставки по напряжению  $U_{ref}$ . На рис. 8,а представлена разность  $dU$  реверсивного регулятора, подключенного последовательно с интеллектуальным модулем ФЭП1, а на рис. 8,б – разность  $dU$  реверсивного регулятора, подключенного последовательно с интеллектуальным модулем ФЭП2. Поскольку разность  $dU$  невелика в установившемся режиме, диаграммы представлены в увеличенном по оси ординат масштабе, пренебрегая значениями  $dU$  в переходных процессах.

Как и следовало ожидать, когда модуль ФЭП1 освещен, реверсивный регулятор работает в режиме повышающего регулятора, разность напряжений  $dU$  положительна, команда на формирование опорного тока  $I_{L.ref}$  в режиме понижающего регулятора выдает «нуль». В случае, когда модуль ФЭП1 затемнен, регулятор работает в режиме понижающего регулятора, разность напряжений  $dU$  отрицательна, команда на формирование опорного тока  $I_{L.ref}$  в режиме повышающего регулятора выдает «нуль». Аналогичная ситуация происходит с модулем ФЭП2.

При различных освещённостях модулей ФЭП напряжение на шине постоянного тока поддерживается равным заданному, а именно 60 В; суммар-

ная мощность на шине постоянного тока также поддерживается на одном уровне – примерно 0,4 Вт (рис. 9).

Таким образом, результаты моделирования в программном комплексе *Matlab Simulink* подтвердили эффективность предложенных схемотехнических решений, а именно:

повышающий регулятор, встроенный в модуль ФЭП, успешно находит точку максимальной мощности с помощью метода возмущения и наблюдения, а также позволяет повышать напряжение до 30 В ( $U_{DC}/2$ );

реверсивный регулятор отлично справляется с задачей выравнивания значений выходных напряжений повышающих регуляторов, тем самым исключая возможность перенапряжений. Вследствие этого снижается вероятность выхода из строя полупроводниковых приборов и пассивных элементов.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 19-08-00018.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов Б.М., Баранов Н.Н., Крюков К.В., Розанов Ю.К. Гибридная система децентрализованного электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии разных видов. – *Электричество*, № 1, 2018, с. 8–13.
2. Li R., Wu B., Li X., Zhou F. and Li Y. Design of wind-solar and pumped-storage hybrid power supply system. – 3rd IEEE Intern. Conf. on Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010, vol. 5, pp. 402–405.

3. **Mohamed A., Khatib T.** Optimal Sizing of a PV/Wind/Diesel Hybrid Energy System for Malaysia. – ICIT, 2013, pp. 752–757.
4. **Walker G.R. and Sernia P.C.** Cascaded DC-DC converter connection of photovoltaic modules. – IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, vol. 19, No. 4, pp. 1130–1139.
5. **Kadri R., Gaubert J.P. and Champenois G.** Nondissipative String Current Diverter for Solving the Cascaded DC-DC Converter Connection Problem in Photovoltaic Power Generation System. – IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, vol. 27, No. 3, pp. 1249–1258.
6. **Bratcu A.I., Munteanu I., Bacha S., Picault D., Raison B.** Cascaded DC-DC Converter Photovoltaic Systems: Power Optimization Issues. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, vol. 58, No. 2, pp. 403–411.
7. **Kryukov K.V., Baranov N.N., Antonov B.M.** Increasing the efficiency of joint operation of a solar-power plant with an industrial alternating-current network. – Russian Electrical Engineering, 2017, 88 (7), pp. 459–464.
8. **Femia N., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M.** Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method. – IEEE Trans. Power Electron., 2005, vol. 20, No.4, pp. 963–973.

[11.03.2019]

*А в т о р ы:* **Антонов Борис Михайлович** – доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), докторскую диссертацию защитил в 1992 г.

**Баранов Николай Николаевич** – доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник ОИВТ РАН, докторскую диссертацию защитил в 1995 г.

**Крюков Константин Викторович** – старший преподаватель кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты» НИУ «МЭИ».

**Розанов Юрий Константинович** – доктор техн. наук, профессор кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты НИУ «МЭИ», докторскую диссертацию защитил в 1987 г.

**Ерохина Екатерина Сергеевна** – аспирант кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты НИУ «МЭИ».

Elektrichestvo, 2019, No. 7, pp. 4–10

DOI:10.24160/0013-5380-2019-7-4-10

## An Intelligent Photovoltaic Module for Distributed Power Generation

**ANTONOV Boris M.** (Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences – JIHT RAS, Moscow, Russia) – Leading Researcher, Dr. Sci. (Eng.)

**BARANOV Nikolay N.** (JIHT RAS, Moscow, Russia) – Professor, Chief Researcher, Dr. Sci. (Eng.)

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

**ROZANOV Yriy K.** (NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

**YEROKHINA Yekaterina S.** (NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Graduate Student

*For designing a hybrid power-generating system (HPGS) containing renewable energy sources (RESs) represented by a windmill and a photovoltaic generator along with standby sources represented by a diesel-generator set (DGS) and a storing device (an electric energy storage), the article describes an approach to solving an important scientific-technical problem of elaborating possible versions of the control system and algorithms for automatic closed-loop control of the primary renewable energy sources, which is aimed at taking the maximum possible power from the RESs in order to limit the use of DGS as part of the HPGS. The new scientific results obtained from the study are oriented at solving practical tasks connected with securing uninterrupted power supply to distributed consumers in different regions of the Russian Federation.*

**Key words:** maximum power point controller, DC controller, photovoltaic systems, series connection of photovoltaic modules, intelligent photovoltaic module

### REFERENCES

1. **Antonov B.M., Baranov N.N., Kryukov K.V., Rozanov Yu.K.** Elektrichestvo – in Russ. (Electricity), No. 1, 2018, pp. 8–13.
2. **Li R., Wu B., Li X., Zhou F. and Li Y.** Design of wind-solar and pumped-storage hybrid power supply system. – 3rd IEEE Intern. Conf. on Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010, vol. 5, pp. 402–405.
3. **Mohamed A., Khatib T.** Optimal Sizing of a PV/Wind/Diesel Hybrid Energy System for Malaysia. – ICIT, 2013, pp. 752–757.
4. **Walker G.R. and Sernia P.C.** Cascaded DC-DC converter connection of photovoltaic modules. – IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, vol. 19, No. 4, pp. 1130–1139.
5. **Kadri R., Gaubert J.P. and Champenois G.** Nondissipative String Current Diverter for Solving the Cascaded DC-DC Converter Connection Problem in Photovoltaic Power Generation System. –

IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, vol. 27, No. 3, pp. 1249–1258.

6. **Bratcu A.I., Munteanu I., Bacha S., Picault D., Raison B.** Cascaded DC-DC Converter Photovoltaic Systems: Power Optimization Issues. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, vol. 58, No. 2, pp. 403–411.

7. **Kryukov K.V., Baranov N.N., Antonov B.M.** Increasing the efficiency of joint operation of a solar-power plant with an industrial alternating-current network. – Russian Electrical Engineering, 2017, 88 (7), pp. 459–464.

8. **Femia N., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M.** Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method. – IEEE Trans. Power Electron., 2005, vol. 20, No.4, pp. 963–973.

[11.03.2019]