

## Управление гибридным энергокомплексом на основе возобновляемых источников энергии разных видов

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

*Рассмотрен гибридный энергокомплекс (ГЭК), содержащий возобновляемые источники энергии (ВИЭ) – ветроэнергетическую установку и фотоэлектрический генератор, а также (в качестве резервных) дизель-генераторную установку. Внедрение ВИЭ требует значительных финансовых затрат, так как технологии генерирования, передачи энергии и управление сетью, в состав которой входят ВИЭ, существенно отличаются от классических и недостаточно отработаны. При характерных для ВИЭ неуправляемых отклонениях в режимах работы использование стандартных методов оптимального распределения потоков мощности может повлечь перегрузки на линиях передачи, вплоть до каскадных отключений. Рассмотрены различные варианты (в зависимости от конкретных задач) систем управления и систем автоматического регулирования первичными источниками энергии при работе ГЭК в автономном режиме и при параллельной работе с электро-сетью.*

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка, фотоэлектрический генератор, дизель-генераторная установка, системы управления, гибридный энергокомплекс

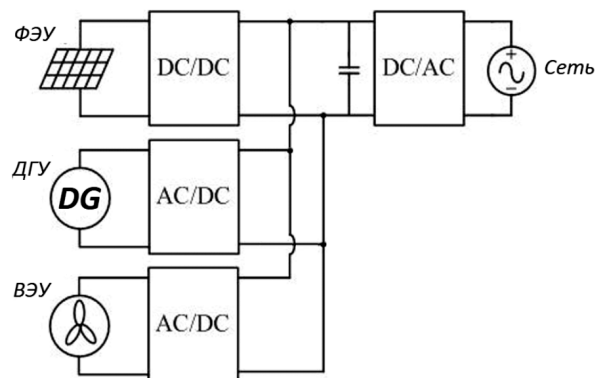
Для структуры современных электроэнергетических систем характерно все возрастающее использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в первую очередь, солнечных батарей и ветрогенераторов. По-видимому, в будущем эта тенденция будет лишь усиливаться, что, в частности, подтверждается перспективными планами развития электроэнергетики, принимаемыми большинством индустриально развитых стран. Внедрение ВИЭ требует значительных финансовых затрат хотя бы потому, что технологии генерирования, передачи энергии и управление сетью, в состав которой входят ВИЭ, существенно отличаются от классических и недостаточно отработаны.

При характерных для ВИЭ неуправляемых отклонениях в режимах работы использование стандартных методов оптимального распределения потоков мощности может повлечь перегрузки на линиях передачи, вплоть до каскадных отключений. Частота и масштабы таких аварий неуклонно растут по всему миру, что явно свидетельствует о неудовлетворительности перспективных планов развития электроэнергетики, основанных лишь на увеличении инвестиций в технологические усовершенствования линий передач мощности и наращивании объемов генерируемой энергии. Поэтому необходимы разработки новых методов оптимизации энергосистем с учетом неопределенностей, присутствующих ВИЭ (устойчивости их работы, непредсказуемых отклонений генерируемых мощностей, значительных изменений нагрузки во времени), а также принципиально новых подходов к управлению

энергосистемами при увеличивающейся интеграции в них возобновляемых источников энергии.

Значительное увеличение доли возобновляемых источников энергии в энергоснабжении потребителей в большинстве стран обусловлено быстрым развитием компонентной базы силовых электронных преобразователей [1]. Поскольку солнечная энергия и энергия ветра во многих регионах дополняют друг друга, совместное применение фотоэлектрических установок (ФЭУ) [2] и ветроэнергетических установок (ВЭУ) для организации энергоснабжения позволяет повысить надежность и обеспечить непрерывность электроснабжения потребителей [3–5].

На рис. 1 представлена обобщённая структура гибридного энергокомплекса (ГЭК) с ФЭУ, ВЭУ и дизель-генераторной установкой (ДГУ). При этом



**Рис. 1.** Схема гибридного энергокомплекса на базе ФЭУ, ВЭУ и ДГУ

ДГУ вводится только для питания нагрузки в автономном режиме работы ГЭК при отсутствии энергии ВЭУ и ФЭУ. При построении системы управления ГЭК, показанной на рис. 1, её целесообразно разбить на несколько локальных контроллеров (осуществляющих управление отдельными источниками) и один глобальный контроллер, осуществляющий выбор режимов работы ГЭК.

В общем случае основные задачи для системы управления ГЭК можно сформулировать следующим образом:

снижение времени работы ДГУ (экономия топлива);

отбор максимальной мощности от источников;

снижение энергопотребления нагрузки (уменьшение доли энергии, передаваемой в нагрузку из сети);

сброс избыточной энергии при работе в автономном режиме;

стабилизация напряжения на нагрузке и обеспечение потребителей энергией высокого качества.

Для разработки алгоритмов управления преобразователями в составе ГЭК необходимо выделить частные цели для каждого из контроллеров.

**Контроллер ФЭУ:** работа в точке максимальной мощности; стабилизация напряжения в звене постоянного тока.

**Контроллер ВЭУ:** работа в точке максимальной мощности; стабилизация напряжения в звене постоянного тока.

**Контроллер ДГУ:** стабилизация напряжения в звене постоянного тока (покрытие дефицита мощности в автономном режиме).

**Контроллер инвертора:** стабилизация напряжения на нагрузке (автономный режим); стабилизация напряжения в звене постоянного тока (работа с сетью); повышение качества электроэнергии (ЭЭ) в точке подключения (работа с сетью).

**Центральный контроллер:** выбор режима работы. На рис. 2,а представлен алгоритм управления при работе ГЭК в автономном режиме. Здесь можно выделить три режима: номинальный режим; работа с избытком мощности ВЭУ и ФЭУ; работа с недостатком мощности ВЭУ и ФЭУ. В общем случае управление ГЭК осуществляется от центрального контроллера, который задает режимы работы локальных контроллеров, связанных с преобразователями различных источников энергии. Функцией

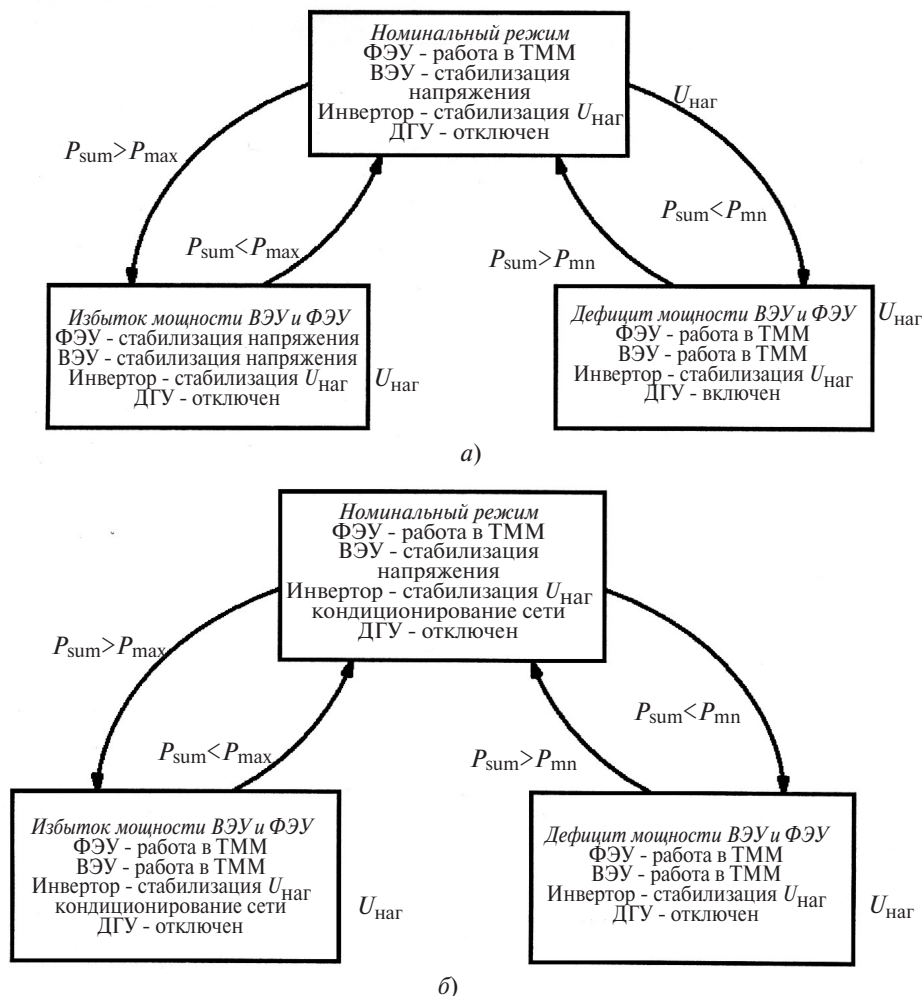


Рис. 2. Алгоритм управления ГЭК: а – в автономном режиме; б – совместно с сетью

центрального контроллера является сбор информации от различных источников энергии и выбор режима управления потоками энергии.

**Режим 1: номинальный режим.** В этом режиме питание нагрузки осуществляется только за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ). ФЭУ работает в режиме отбора максимальной мощности, а ВЭУ работает в режиме стабилизации напряжения в звене постоянного тока. Инвертор при этом осуществляет функцию поддержания напряжения на нагрузке. ДГУ находится в отключенном состоянии.

**Режим 2: работа с избытком мощности ВЭУ и ФЭУ.** В этом режиме питание нагрузки осуществляется только за счет ВИЭ; ФЭУ и ВЭУ работают в режиме стабилизации напряжения в звене постоянного тока. При превышении напряжением на шине постоянного тока значения  $U_{max1}$  (соответствует  $P_{max}$ ) проводится подключение 1-й ступени балластной нагрузки к звену постоянного тока. Если напряжение превышает значение  $U_{max2}$  (соответствует  $P_{max2}$ ) то параллельно подключается второй балластный резистор. При дальнейшем повышении напряжения в звене постоянного тока отключается один из источников (источник с меньшей выходной мощностью). Инвертор при этом осуществляет функцию поддержания напряжения на нагрузке; ДГУ находится в отключенном состоянии.

**Режим 3: работа с дефицитом мощности ВЭУ и ФЭУ.** В этом режиме питание нагрузки осуществляется как за счет ВИЭ, так и за счет ДГУ. ФЭУ и ВЭУ работают в режиме отбора максимальной мощности. ДГУ переходит во включенное состояние и находится в режиме стабилизации напряжения звена постоянного тока. Переход в этот режим осуществляется, если напряжение на шине пост-

янного тока опускается ниже значения  $U_{min}$  (соответствует  $P_{min}$ ). При повышении суммарной выходной мощности ФЭУ и ВЭУ более  $P_{min}$  ГЭК переходит в нормальный режим. Инвертор при этом осуществляет функцию поддержания напряжения на нагрузке.

**Разработка алгоритма управления первичными источниками энергии при работе ГЭК с внешней электросетью.** На рис. 2,б представлен алгоритм управления ГЭК. При работе ГЭК с внешней электросетью можно выделить три возможных режима работы: номинальный режим; работа с избытком мощности ВЭУ и ФЭУ; работа с недостатком мощности ВЭУ и ФЭУ. Как и для случая автономного режима работы (рассмотренного в 3), управление ГЭК осуществляется от центрального контроллера, который задает режимы работы локальных контроллеров, связанных с преобразователями, различных источников энергии. Функцией центрального контроллера является сбор информации от различных источников энергии и выбор режима управления потоками энергии от этих источников.

**Режим 1: номинальный режим.** В этом режиме значение мощности, отдаваемой в сеть, ограничено, так как энергия генерируемая ВИЭ, потребляется собственной нагрузкой ГЭК. Значение передаваемой в электросеть мощности может определяться исходя из условий договора на поставку электроэнергии или исходя из необходимости снижения нагрузки на энергосистему, например, в часы пикового энергопотребления. В этом режиме ФЭУ работает в точке максимальной мощности (ТММ), а ВЭУ работает для покрытия разницы между возможностями ФЭУ и требуемым для нагрузки значением мощности.

**Режим 2: работа с избытком мощности ВЭУ и ФЭУ.** В этом режиме в сеть передается максималь-

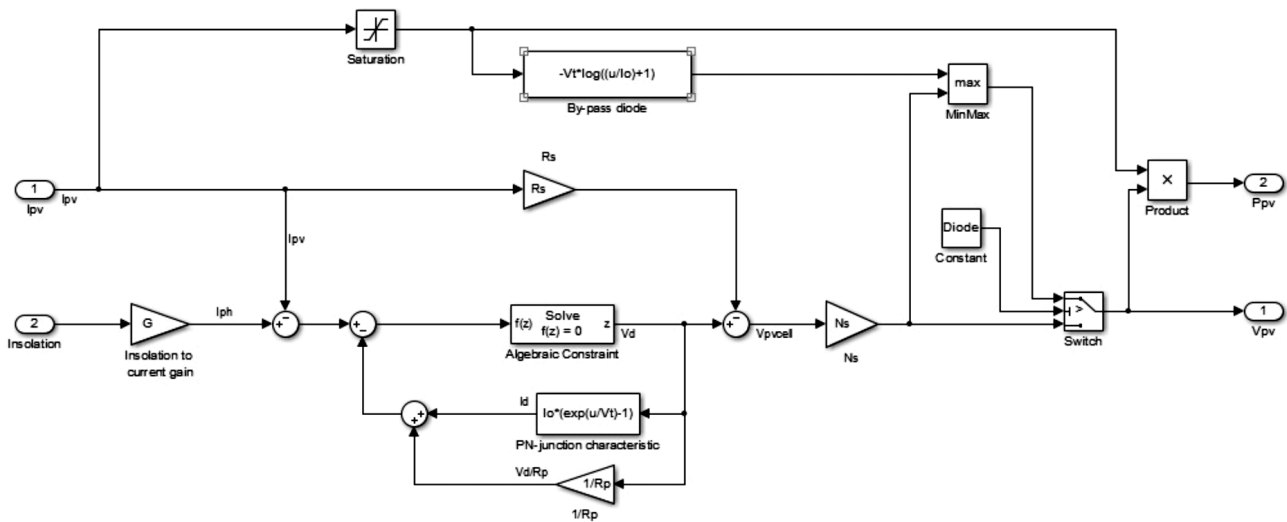


Рис. 3. Simulink модель модуля ФЭП

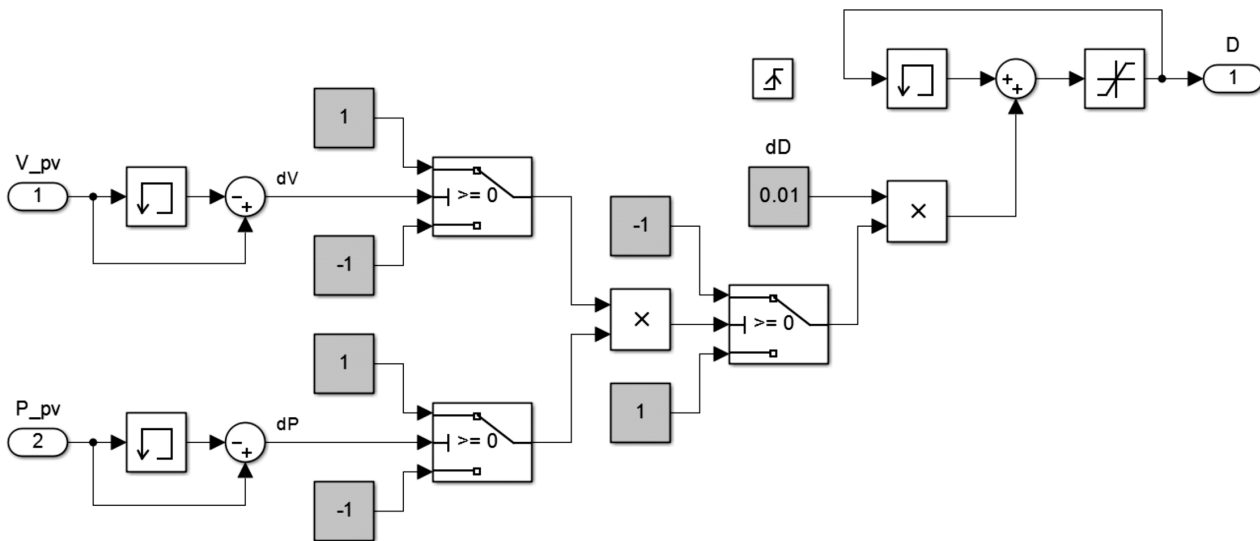


Рис. 4. Блок отслеживания в точке максимальной мощности

но возможное количество энергии, вырабатываемой ФЭУ и ВЭУ, которые работают в режиме поиска ТММ. В нормальном режиме работы инвертор осуществляет стабилизацию напряжения на шине постоянного тока, а также выполняет роль кондиционера сети, повышая качество электроэнергии в точке подключения; ДГУ находится в отключенном состоянии.

*Режим 3: работа с дефицитом мощности ВЭУ и ФЭУ.* В этом режиме ГЭК получает энергию как от ВЭУ и ФЭУ, так и от сети переменного тока. Сетевой инвертор работает в режиме стабилизации напряжения в точке подключения ГЭК и режиме кондиционера сети. Для повышения эффективности ГЭК ФЭУ и ВЭУ управляются с учетом работы в точке максимальной мощности; ДГУ находится в отключенном состоянии.

**Разработка компьютерной модели ГЭК с системой автоматического управления и регулирования первичных возобновляемых источников энергии. Модель фотоэлектрической установки.** Для моделирования была принята модель модуля ФЭП с входными параметрами: ток фотоэлектрического преобразователя  $I_{PV}$ , А, мощность солнечного излучения  $W$ , Вт/м<sup>2</sup>. В качестве параметров модели для расчета текущей рабочей используются следующие параметры стандартного модуля ФЭП: ток короткого замыкания  $I_{SC}$ , напряжение холостого хода  $U_{OC}$ , ток в точке максимальной мощности  $I_R$ , напряжение в точке максимальной мощности  $U_R$ .

Составленная в программном комплексе MATLAB/Simulink схема модуля ФЭП представлена на рис. 3.

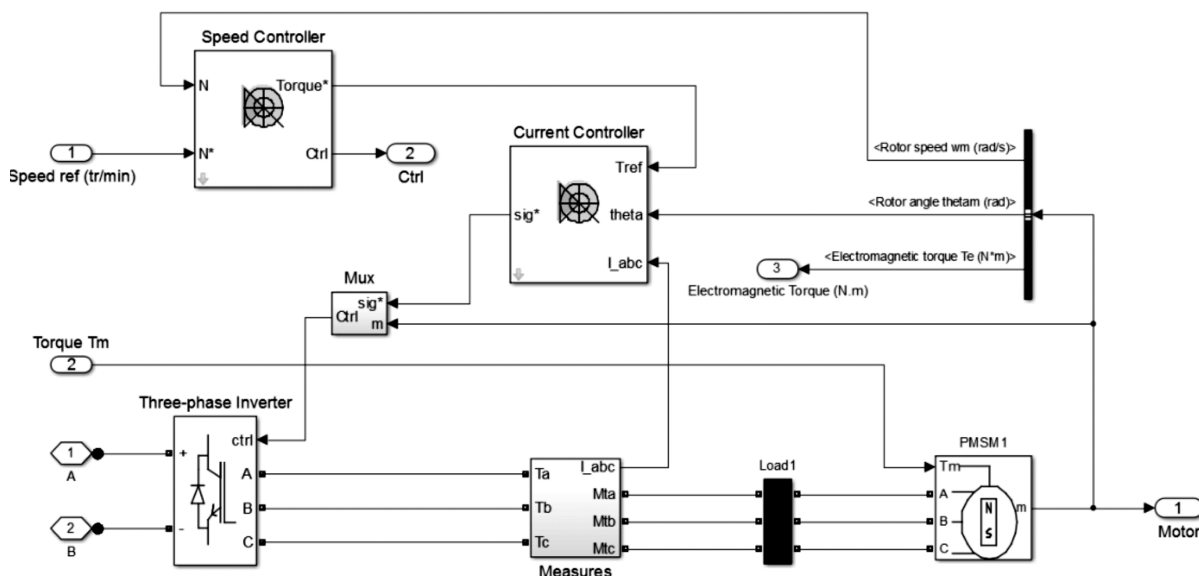


Рис. 5. Компьютерная модель ВЭУ

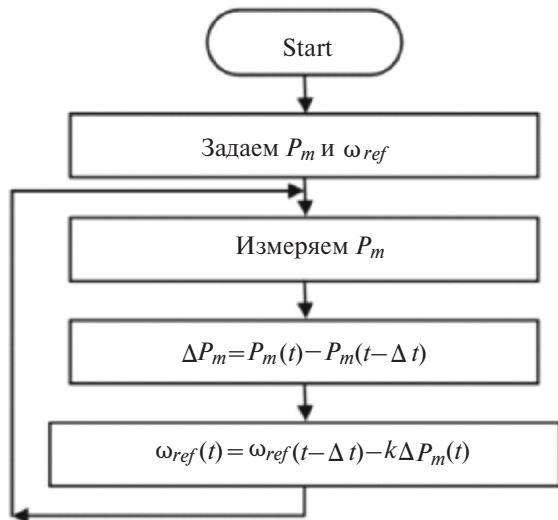


Рис. 6. Алгоритм задания уставки по скорости ветроколеса

На рис. 4 представлена схема Simulink-модели системы управления регуляторами постоянного тока с учетом их работы в ТММ.

На вход системы управления поступают текущие значения выходного напряжения и мгновенной мощности модуля ФЭП. Эти параметры сравниваются со значениями, полученными на предыдущем периоде измерений, и вычисляются разности  $dU$  и  $dP$ . Далее в зависимости от знака произведения  $(dUdP)$  формируется сигнал на приращение или уменьшение текущего значения коэффициента заполнения на  $dD$  (где  $D$  – коэффициент заполнения импульса преобразователя постоянного тока ППТ).

**Модель ветроэнергетической установки.** На рис. 5 представлена схема модели ВЭУ, которая состоит из синхронного генератора ( $PMSM1$ ), контроллеров скорости и тока ( $Speed Controller$ ) и трехфазного выпрямителя на полностью управляемых транзисторах ( $Three-phase Inverter$ ). Оптимизация работы ВЭУ в большинстве случаев зависит от используемого алгоритма поиска точки максимальной мощности. Контроллер ТММ используется для поддержания относительной скорости вращения ветроколеса с учетом передачи максимальной мощности в нагрузку.

Для поиска ТММ система управления должна учитывать ряд параметров ветротурбины. В случае, если нет данных о параметрах турбины и скорости

вращения ветроколеса, контроллер должен отслеживать точку максимальной мощности, используя средства регулирования уставки по скорости вращения ветроколеса.

Блок-схема алгоритма управления ветротурбиной представлена на рис. 6, где  $P_m$  – вырабатываемая ветротурбиной механическая мощность. Для моделирования значение коэффициента  $k$  выбрано равным 1000.

**Модель дизель-генераторной установки.** Дизель-генераторные установки являются самыми распространенными резервными источниками электроснабжения. Малое время выхода на номинальную мощность является их преимуществом, так как ДГУ могут выходить на полную мощность нагрузки в течение нескольких десятков секунд. Установка состоит из дизельного двигателя, регулятора оборотов и синхронного генератора.

Нагрузочная характеристика дизельных двигателей является в значительной степени нелинейной и зависит от мощности нагрузки, скорости вращения и окружающей температуры. При этом наличие нелинейной зависимости между впрыском топлива и выходным моментом двигателя дополнительно усложняет управление ДГУ.

Регулирование скорости вращения двигателя осуществляется путем контроля подачи топлива. Так, вне зависимости от нагрузки, регулятор оборотов можно настроить на работу с постоянной скоростью вращения. Для моделирования ДГУ использовался предельный регулятор частоты вращения. Модель двигателя с системой регулирования представлена на рис. 7.

Управление регулятором оборотов может осуществляться как по скорости вращения, так и по частоте выходного напряжения. Однако управление по скорости вращения двигателя является более предпочтительным, так как уровень выходного напряжения зависит от напряжения возбуждения генератора. И в случае аварии системы возбуждения остаточной намагниченности может быть недостаточно для получения требуемого выходного напряжения. Это может привести к разрушению подшипников двигателя вследствие длительной работы с повышенной частотой вращения.

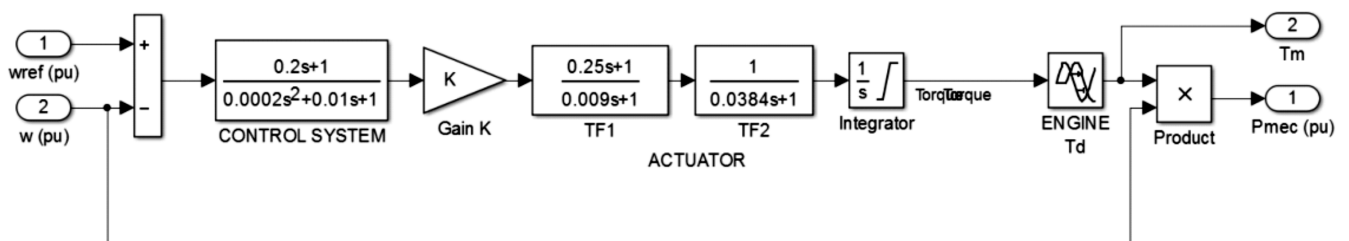


Рис. 7. Модель дизельного двигателя с системой регулирования оборотов



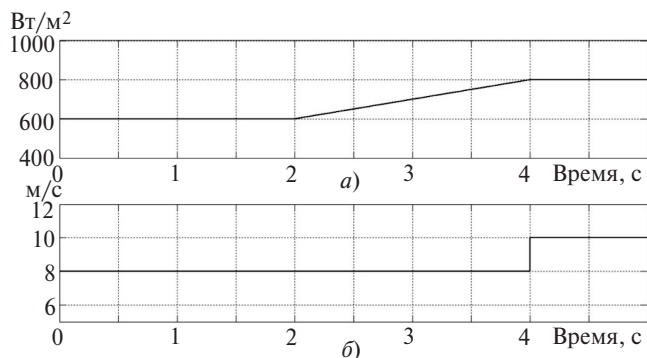


Рис. 8. Диаграммы солнечного излучения (а) и скорости ветра (б)

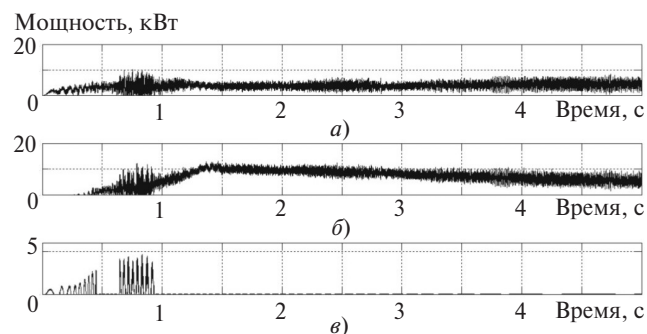


Рис. 9. Мощность на выходе ФЭУ (а), ВЭУ (б) и ДГУ (в)

**Исследование переходных процессов в ГЭК при работе в различных режимах работы.** На рис. 8 представлены диаграммы изменения солнечного излучения и скорости ветра. Интенсивность солнечного излучения плавно изменяется с 600 до 800 Вт/м<sup>2</sup>, в то время как скорость ветра скачкообразно увеличивается с 8 до 10 м/с.

На рис. 9 представлены диаграммы мощности, генерируемой ФЭУ, ВЭУ и ДГУ. Среднее значение мощности, генерируемой ФЭУ, составляет примерно 6 кВт. Максимальная выходная мощность ВЭУ не превышает 10 кВт и зависит от мощности нагрузки. Даже при увеличении скорости ветра, в момент времени 4 с мощность на выходе ВЭУ снижается, так как снижается мощность нагрузки и центральный контроллер отключает балластную нагрузку. Дизель-генераторная установка отключается, если суммарная мощность, генерируемая ВЭУ и ФЭУ, превышает значение 5 кВт.

На рис. 10,а показан график мощности в нагрузке, а на рис. 10,б — график мощности, рассеиваемой на балластных резисторах. Подключение балластных резисторов осуществляется, если суммарная мощность на выходе ВЭУ и ФЭУ превышает 10 кВт (подключение 1-й ступени) и 12,5 кВт (подключение 2-й ступени).

Для поддержания (на интервале времени от 0,8 до 1,5 с) в заданных пределах напряжения на шине постоянного тока контроллер подключает балласт-

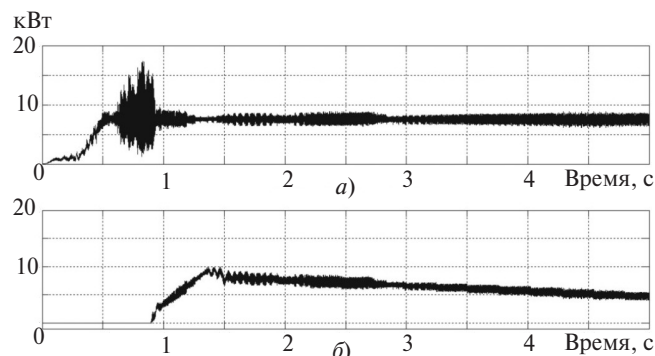


Рис. 10. Мощность в нагрузке

ные нагрузки. После 1,5 с происходит последовательное отключение балластных резисторов.

**Полученные результаты и рекомендации для практического использования.** Гибридные энергетические комплексы могут обеспечить надежное электроснабжение потребителей энергией высокого качества. В отличие от систем с ВИЭ, где используется только один источник энергии, ГЭК на базе ФЭУ, ВЭУ и ДГУ может обеспечить надежное электроснабжение потребителей в автономном режиме работы, позволив при этом снизить требования к накопителям электроэнергии. Более того, становится возможным значительное снижение потребления топлива ДГУ при реализации «микросетей» (Microgrid), составленных из рассмотренных для ГЭК.

Однако внедрение гибридных энергоисточников на практике требует реализации комплексного подхода по разработке систем их автоматизированного управления, рассматриваемых в статье.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blaabjerg F., 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.
2. 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.
3. Ambia M., Islam M., Shoeb M., Maruf M., Mohsin A. An analysis & design on micro generation of a domestic solar-wind hybrid energy system for rural & remote areas-perspective Bangladesh. — Proc. of the 2nd Intern.conf. on Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE), 2010, vol. 2, pp. 107–110.
4. R. Li, B. Wu, X. Li, F. Zhou, Y. Li. Design of wind-solar and pumped-storage hybrid power supply system. — Proc. of the 3rd IEEE Intern.conf. on Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010, vol. 5, pp. 402–405.
5. Mohamed A., Khatib T. Optimal Sizing of a PV/Wind/Diesel Hybrid Energy System for Malaysia, ICIT, 2013, 752–757.

[02.04.2018]

*А в т о р ы : Антонов Борис Михайлович в 1992 г. защитил в Московском энергетическом институте (МЭИ) — ныне Национальный исследовательский университет «НИУ «МЭИ» — докторскую диссертацию «Система нагрузки и преобразования электрической энергии МГД генератора». Доктор техни-*

ческих наук, ведущий научный сотрудник объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

**Баранов Николай Николаевич** 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** в 2006 г. окончил МЭИ. Старший преподаватель кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты» «НИУ «МЭИ».

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

*Elektrichestvo*, 2018, No. 7, pp. 19–25

DOI:10.24160/0013-5380-2018-7-19-25

## Control of a Hybrid Power System Containing Different Kinds of Renewable Energy Sources

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

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

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

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

*The article considers a hybrid power system (HPS) containing renewable energy sources (RES), namely, a wind mill and a photovoltaic generator, as well as a diesel-generator unit (serving as a standby power source). The introduction of RES involves significant capital outlays because the technologies of generation, power transmission, and control of the grid containing RES differ considerably from the classic ones and have not been developed to a sufficient extent. With uncontrolled deviations of operating modes, which are quite characteristic of RES, the use of standard methods for optimally distributing the power flows may entail overloading of power lines up to their cascade disconnections. The article considers different (depending on particular tasks) versions of control systems and systems for automatic closed-loop control of primary sources of energy with the HPS operating in the isolated mode and in parallel with the grid.*

*Key words: windmill, photovoltaic generator, diesel-generator unit, electric energy source control systems*

### REFERENCES

1. **Blaabjerg F., 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.
2. **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.
3. **Ambia M., Islam M., Shoeb M., Maruf M., Mohsin A.** An analysis & design on micro generation of a domestic solar-wind

hybrid energy system for rural & remote areas-perspective Bangladesh. – *Proc of the 2nd Intern.conf. on Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE)*, 2010, vol. 2, pp. 107–110.

4. **R. Li, B. Wu, X. Li, F. Zhou, Y. Li.** Design of wind-solar and pumped-storage hybrid power supply system. – *Proc of the 3rd IEEE Intern.conf. on Computer Science and Information Technology (ICCSIT)*, 2010, vol. 5, pp. 402–405, 2010.

5. **Mohamed A., Khatib T.** Optimal Sizing of a PV/Wind/Diesel Hybrid Energy System for Malaysia, *ICIT*, 2013, 752–757.

[02.04.2018]