

УДК 620.92

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНОГО
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА, В СОСТАВ КОТОРОГО
ВХОДЯТ НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ
ЭНЕРГИИ РАЗНЫХ ТИПОВ**

© 2021 г. Н. Н. Баранов¹, *, К. В. Крюков², **

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт
высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Москва, Россия

*e-mail: nsmppve@iht.mpei.ac.ru

**e-mail: jun7@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.04.2021 г.

После доработки 03.08.2021 г.

Принята к публикации 06.08.2021 г.

Решается актуальная научно-практическая задача современной энергетики, нацеленная на разработку универсальных гибридных электроэнергетических комплексов на основе нетрадиционных и возобновляемых источников энергии разных типов.

Ключевые слова: гибридная энергетическая установка, система автоматического управления, алгоритмы режимов работы

DOI: 10.31857/S0002331021040038

ВВЕДЕНИЕ

Специалисты ОИВТ РАН и НИУ “МЭИ” в рамках проекта РФФИ ведут разработку интеллектуального гибридного электроэнергетического комплекса (ГЭК), в состав которого могут входить нетрадиционные и возобновляемые источники энергии разных типов.

Актуальность проекта определяется необходимостью развития и совершенствования автономной и распределенной энергетики, поскольку в связи с географическими особенностями нашей страны примерно 2/3 ее территории не охвачены сетями электропередач и находятся в зонах децентрализованной энергетики. В этих зонах значительная часть потребителей питается от дизель-генераторных установок (ДГУ), потребляющих дорогое дизельное топливо.

Именно в таких районах наиболее эффективно построение современного энергообеспечения с привлечением местных энергоресурсов, а также возобновляемых источников энергии (ВИЭ), среди которых наиболее доступными являются ветровая и солнечная виды энергии, преобразуемые в электроэнергию с помощью ветроэнергетических установок (ВЭУ) и фотоэлектрических генераторов (ФЭГ).

Проект имеет фундаментальный характер и нацелен на получение новых знаний, необходимых для разработки единой по структуре и составным частям гибридной системы децентрализованного энергоснабжения, реализуемой на основе разнородных энергоустановок.

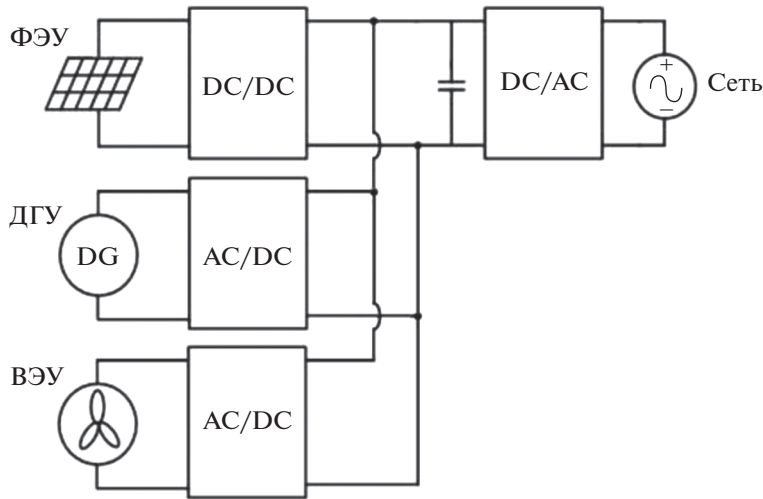


Рис. 1. Гибридный энергетический комплекс на базе фотоэлектрической, ветроэнергетической и дизель-генераторной установок.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК

При совместном использовании фотоэлектрического генератора (ФЭГ) и ветроэнергетической установки (ВЭУ) для электропитания потребителей и при одновременном введении в эту систему дизель-генераторной установки (ДГУ) формируется гибридный энергетический комплекс (ГЭК), обеспечивающий потребителей электроэнергией при любых отклонениях в режимах ВИЭ (рис. 1).

В литературе приводятся структурные схемы отдельных ГЭК, однако описания и алгоритмы функционирования систем управления таких комплексов, как правило, отсутствуют.

Алгоритмы и программы для микропроцессоров, входящих в состав систем управления преобразователями, являются коммерческой тайной фирм-изготовителей. Это обстоятельство затрудняет использование зарубежного опыта при разработке перспективных ГЭК, и вместе с тем стимулирует отечественные разработки импортозамещающих электротехнических устройств (в первую очередь силовых полупроводниковых преобразователей), обеспечивающих функционирование автономных энергокомплексов, реализуемых на базе разнородных первичных источников энергии.

Следует заметить, что полупроводниковые преобразовательные устройства (ППУ) являются основным структурным звеном в системах электроснабжения, использующих нетрадиционные и возобновляемые источники энергии разных типов. На них возлагаются функции регуляторов тока и напряжения, защиты источника и потребителя при возникновении аварийных ситуаций, обеспечение требуемого качества электроэнергии. При комбинированных схемах электроснабжения они согласуют выходные параметры автономного энергоисточника с сетью промышленной частоты. Именно с полупроводниковым преобразователем на выходе первичный источник энергии (будь то фотоэлектрический генератор, ветроэнергетическая установка или иной другой) представляет собой автономный блок энергоснабжения. Выбор оптимального преобразователя для конкретного источника (с обеспечением их электромагнитной совместимости) позволяет значительно повысить эффективность, качество и надежность энергоснабжения потребителей постоянным или переменным током.

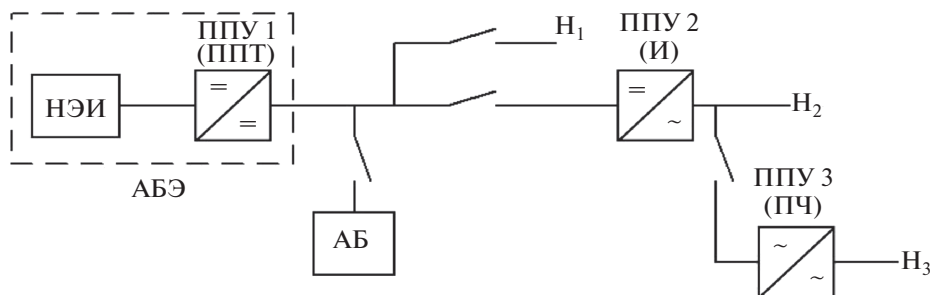


Рис. 2. Схема электроснабжения с нетрадиционным энергоисточником и полупроводниковыми преобразовательными устройствами: ППУ1, ППУ2, ППУ3 – преобразовательные устройства; ППТ – преобразователь постоянного тока в постоянный; И – инвертор; ПЧ – преобразователь частоты; АБ – аккумуляторная батарея; H_1 , H_2 , H_3 – распределенные потребители (нагрузка); АБЭ – автономный блок электроснабжения.

На рис. 2 схематично показаны различные типы силовых преобразовательных устройств, используемых в составе с нетрадиционными энергоустановками.

Как видно из рис. 2, в зависимости от рода тока, потребляемого нагрузкой, преобразовательное устройство может быть выполнено в виде инвертора с заданной частотой переменного тока на выходе или в виде конвертора – преобразователя постоянного тока в постоянный (ППТ) с варьированием (повышением или понижением) уровня напряжения.

Анализ показал, что при всем многообразии существующих силовых преобразовательных устройств, разрабатываемых в основном для различных технических приложений традиционной электротехники, для оптимального функционирования комбинированных блоков электропитания необходимо разрабатывать новые ППУ, учитывающие особенности работы возобновляемых источников энергии в их составе.

Требования к новым полупроводниковым преобразователям, предназначенным для работы с нетрадиционными источниками энергии (НИЭ), следующие:

- большая кратность уровня выходного напряжения по отношению к входному;
- высокий КПД;
- широкий диапазон изменения входного напряжения;
- малые пульсации выходного тока;
- малые габариты;
- возможность селективного отключения аварийного потребителя при многонормальной системе энергоснабжения.

Одновременно с перечисленными требованиями при разработке новых ППУ могут решаться следующие технические задачи:

- получение максимальной мощности в рабочей точке;
- обеспечение заданного графика нагружения нескольких НИЭ с различным уровнем выходного напряжения;
- обеспечение запуска системы управления при минимальном входном напряжении и подключенной нагрузке;
- уменьшение количества элементов преобразователя.

Сформулированным требованиям удовлетворяет ряд разработанных электрических схем преобразователей, предназначенных для работы с ВИЭ в составе ГЭК, на которые были получены патенты РФ [1–3].

Разработанные и запатентованные импульсные преобразователи могут повышать напряжение источника питания в 10 и более раз. При этом КПД ППУ достигает 85–95% в зоне длительной работы. Пульсации тока возможны на уровне от 0.01% до 0.5%.

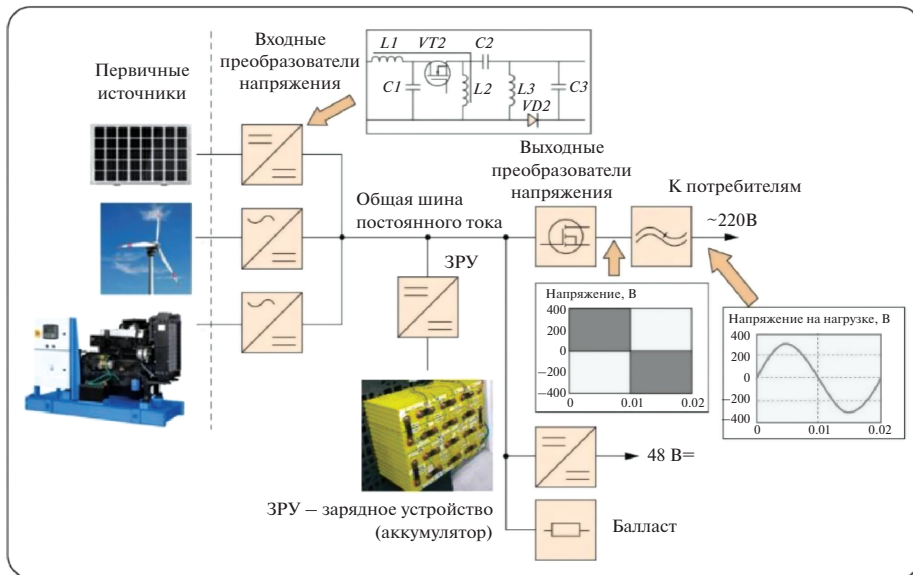


Рис. 3. Разработанная структурная схема гибридного энергетического комплекса, использующего возобновляемые источники энергии.

Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в разработанных ППУ с помощью программ MATLAB продемонстрировало их преимущества в сравнении с известными электротехническими аналогами.

При построении гибридного энергокомплекса на базе ВИЭ необходимо решить электротехническую задачу обеспечения эффективной совместной работы всех разнородных первичных энергоисточников, входящих в его состав. Фотоэлектрический генератор вырабатывает постоянный ток, ветроэнергетическая и дизель-генераторная установки поставляют в энергокомплекс трехфазный ток. Сложные электромагнитные процессы, сопровождающие совместную работу трех энергоисточников (особенно при переходе нагрузки с одного источника питания на другой), многократно усложняют систему управления и регулирования гибридного энергокомплекса и понижают ее надежность.

Задача обеспечения совместной работы трех разнородных источников питания упрощается при введении в ГЭК накопителя энергии в виде аккумуляторной батареи (АБ). В структурной схеме с накопителем нагрузка питается от аккумулятора однофазным или трехфазным переменным напряжением, вырабатываемым инвертором, который должен также обеспечивать стабильное напряжение переменного тока стандартного качества на выходе из системы энергоснабжения. Связь ФЭП с АБ осуществляется с помощью преобразователя постоянного тока (ППТ), а связь ВЭУ и ДГУ с аккумуляторной батареей — с помощью управляемых выпрямителей (рис. 3).

Одной из ключевых научно-технических задач при проектировании (и тиражировании) комбинированных систем энергоснабжения для конкретных условий эксплуатации является разработка системы автоматического управления и набора алгоритмов для ведения требуемых (заранее задаваемых) режимов работы ГЭК.

В качестве примера рассмотрим систему комбинированного электроснабжения с использованием фотоэлектрических генераторов (солнечных батарей) [4].

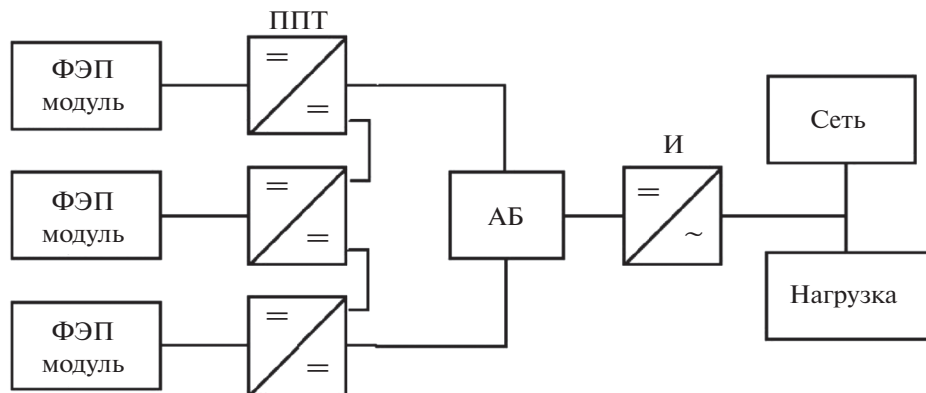


Рис. 4. Схема электроснабжения с ФЭП (солнечными батареями).

Для согласования выходных параметров фотоэлектрических преобразователей и входных параметров потребителей электроэнергии была предложена наиболее перспективная схема электроснабжения, представленная на рис. 4.

В этой схеме преобразователь постоянного тока в постоянный построен по **топологии мультиконвертера**. В каждый модуль фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) встроен регулятор постоянного тока, далее регуляторы соединяются последовательно между собой для формирования шины высокого напряжения постоянного тока. Шина постоянного тока соединяется с сетью переменного тока при помощи инвертора (**И**). В системе электропитания предусмотрена аккумуляторная батарея **АБ**.

Последовательное включение преобразователей постоянного тока, работающих от модулей ФЭП, имеет следующие преимущества:

- контроль точки максимальной мощности для каждого модуля;
- большая эффективность при работе с частично затененной солнечной батареей.

Основным достоинством этой топологии является реализация отбора максимальной мощности от ФЭП (например, от частично затененной солнечной батареи).

Здесь **инвертор (И)** выполнен по трехфазной мостовой схеме на полностью управляемых полупроводниковых приборах и выполняет следующие функции:

- генерирование активной мощности в сеть и в нагрузку;
- компенсацию реактивной мощности;
- фильтрацию высших гармоник тока.

Для данной схемы электроснабжения была предложена **система управления** (рис. 5), в которой можно выделить три структурных составляющих:

- контроллер рабочей точки с максимальной мощностью – **MPP** (от англ. – Maximum Power Point);
- контроллер режимов работы системы;
- устройство управления инвертором.

Контроллер MPP – обеспечивает отбор максимальной мощности от ФЭП и поддерживает требуемое значение напряжения на шине постоянного тока.

Устройство управления инвертором И – осуществляет регулирование режимов работы инвертора, обеспечивая компенсацию реактивной мощности сети, фильтрацию токов высших гармоник, а также передачу избыточной активной мощности в сеть или на нагрузку.

Контроллер режимов работы регулятора – осуществляет слежение за состоянием системы и обеспечивает основные режимы работы: автономный или режим работы от сети.

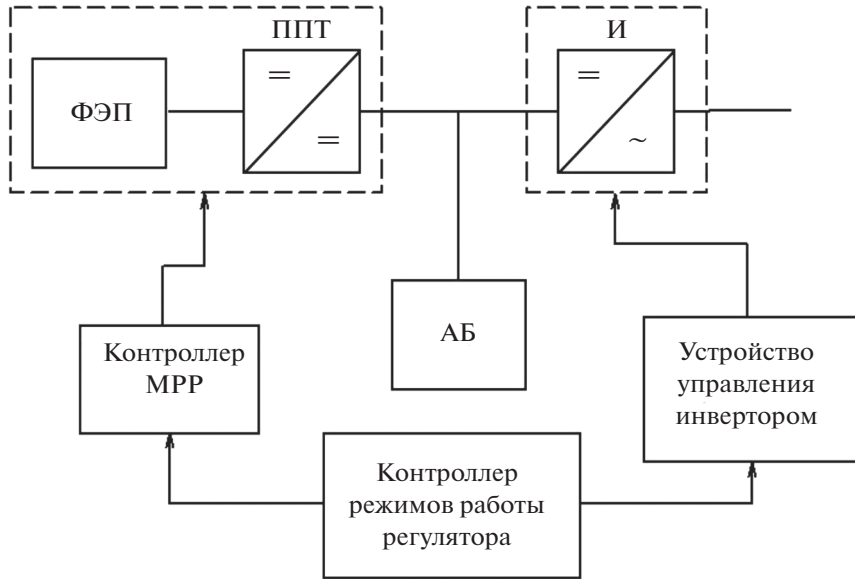


Рис. 5. Система управления.

Структурные схемы распределения потоков мощности при различных режимах работы системы электроснабжения с ФЭП (рис. 4) приведены на рис. 6.

– **Автономный режим работы** (рис. 6а). В этом режиме мощность, генерируемая ФЭП, используется для питания нагрузки $P_{\text{нагр}}$ и для подзарядки $P_{\text{зар}}$ аккумуляторных батарей АБ. В ночное время или когда мощность, генерируемая ФЭП мала, питание нагрузки осуществляется от аккумуляторных батарей.

– **Режим работы от сети** (рис. 6б). При подключении нагрузки к сети инвертор переходит в режим компенсации реактивной мощности Q , повышая $\cos\varphi$ сети и обеспечивая синусоидальность потребляемого нагрузкой тока. Одновременно производится подзарядка аккумуляторной батареи АБ.

Разработанная схема комбинированного электроснабжения позволяет обеспечивать качественное и бесперебойное питание потребителей при использовании нетрадиционных источников энергии – солнечных батарей.

При построении системы управления гибридного энергокомплекса, содержащего наряду с ФЭП, также ВЭУ и ДГУ (схематически изображенного на рис. 3), ее 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 дизель-генераторной установки (экономия органического топлива);
- Отбор максимальной мощности от первичных источников (ВИЭ);
- Снижение энергопотребления нагрузки (уменьшение доли энергии, поступающей в нагрузку из сети);
- Сброс избыточной энергии при работе в автономном режиме (в аккумулятор или в сеть);

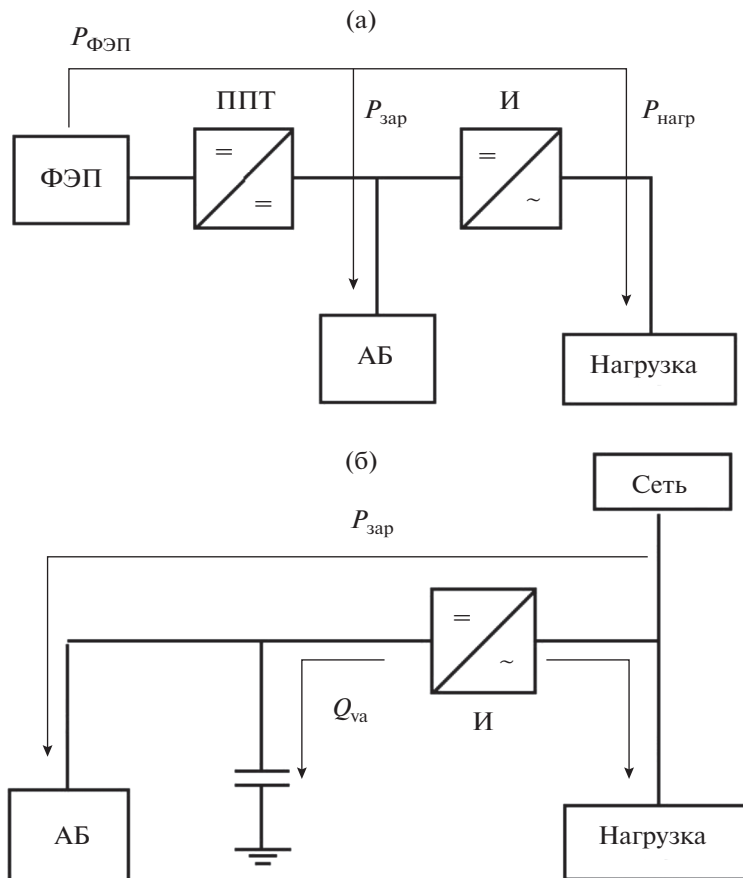


Рис. 6. Структурные схемы потоков мощности при работе системы комбинированного электроснабжения: (а) автономный режим работы (от ФЭП); (б) режим работы от сети.

• Стабилизация напряжения на нагрузке и обеспечение потребителей электроэнергией высокого качества.

Компьютерная модель гибридного энергокомплекса, включающая систему автоматического управления первичными источниками энергии – фотоэлектрической, ветроэнергетической и дизель-генераторной установками, представлена на рис. 7.

Компьютерное моделирование системы управления гибридного энергокомплекса позволило выбрать оптимальные комбинации режимов работы первичных источников энергии – ФЭП, ВЭУ, ДГУ, а также силовых преобразовательных устройств, с учетом их электромагнитной совместимости.

При построении алгоритмов управления преобразователями в составе ГЭК были выделены частные цели для каждого из контроллеров.

Контроллер фотоэлектрической установки (ФЭУ):

- Работа в точке максимальной мощности;
- Стабилизация напряжения в звене постоянного тока.

Контроллер ветроэнергетической установки (ВЭУ):

- Работа в точке максимальной мощности;
- Стабилизация напряжения в звене постоянного тока.

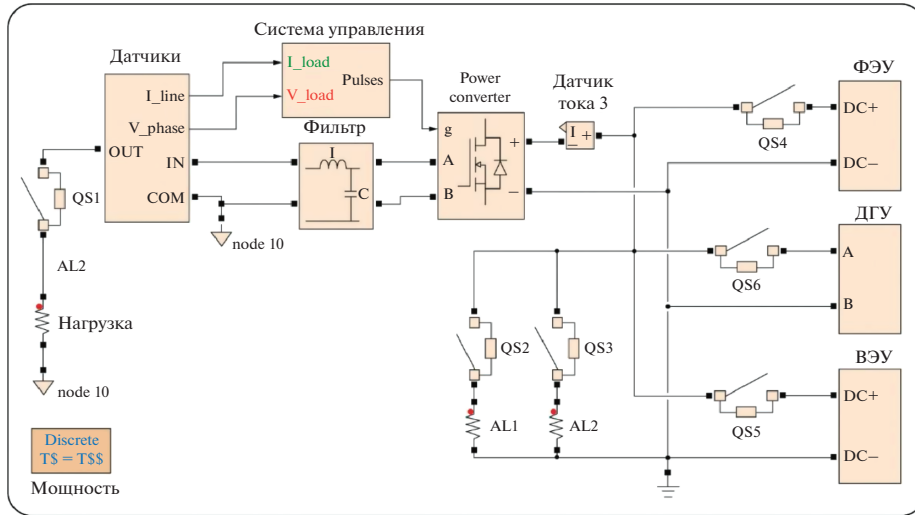


Рис. 7. Разработанная компьютерная модель гибридного энергокомплекса.

Контроллер дизель-генераторной установки (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 (при подключении к сети).

Центральный контроллер:

- Выбор режима работы.

В общем случае управление ГЭК осуществляется от центрального контроллера, который задает режимы работы локальных контроллеров, связанных с преобразователями различных первичных источников энергии. Функцией центрального контроллера является сбор информации от различных источников энергии и выбор режима управления потоками энергии от этих источников.

На рис. 8 представлена характерная структура алгоритмов управления при работе ГЭК в разных режимах: в автономном режиме (без связи с внешней электросетью), а также совместно с сетью.

Обозначения. Statechart – диаграмма состояний: Psum – текущая суммарная выходная мощность ФЭУ и ВЭУ; Pmax – максимальная требуемая мощность нагрузки; Pmin – минимальная допустимая мощность нагрузки.

Описание состояний: NormMode – нормальный режим работы; OverPow – работа с избытком мощности ФЭУ и ВЭУ; LowPow – работа с дефицитом мощности ФЭУ и ВЭУ.

РАССМОТРИМ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ ГЭК В АВТОНОМНОМ РЕЖИМЕ

В номинальном режиме работы ГЭК 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.

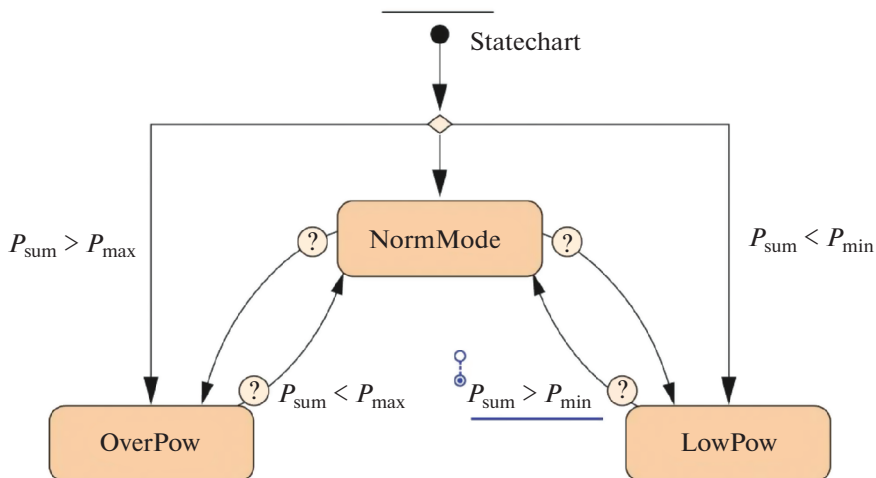


Рис. 8. Алгоритмы управления гибридного энергокомплекса.

В режиме работы с избытком мощности ВЭУ и ФЭУ питание нагрузки осуществляется только за счет ВИЭ. ФЭУ и ВЭУ работают в режиме стабилизации напряжения в звене постоянного тока. Инвертор при этом осуществляет функцию поддержания напряжения на нагрузке. ДГУ находится в отключенном состоянии.

В режиме работы с дефицитом мощности ВЭУ и ФЭУ 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 постоянного тока опускается ниже значения V_{min} (соответствует P_{min}). При повышении суммарной выходной мощности ФЭУ и ВЭУ выше P_{min} , ГЭК переходит в нормальный режим. Инвертор при этом осуществляет функцию поддержания напряжения на нагрузке.

При совместной работе ГЭК с внешней электросетью — также можно выделить три характерных режима работы: номинальный режим; работа с избытком мощности ВЭУ и ФЭУ; работа с недостатком мощности ВЭУ и ФЭУ.

Номинальный режим. В этом режиме величина мощности, отдаваемой в сеть, ограничена, так как энергия, генерируемая ВИЭ, потребляется собственной нагрузкой ГЭК. Величина 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 номинальном режиме ФЭУ работает в точке максимальной мощности (ТММ), а ВЭУ работает с учетом того, чтобы покрыть разницу между возможностями ФЭУ и требуемым для нагрузки значением мощности. При повышении мощности генерируемой ВИЭ до значения P_{max} , подключаются балластные резисторы на выходах ВИЭ, либо система ГЭК переходит в режим работы с избытком мощности. Инвертор работает в режиме стабилизации напряжения на шине постоянного тока, а также выполняет роль кондиционера сети, повышая качество электроэнергии в точке подключения. ДГУ в этом режиме остается незадействованной.

Работа с избытком мощности ВЭУ и ФЭУ. В этом режиме в сеть передается максимально возможное количество энергии, вырабатываемой первичными энергоисточниками. Фотоэлектрическая и ветроэнергетическая установки работают в режиме поиска точки максимальной мощности (ТММ). Инвертор осуществляет стабилизацию

напряжения на шине постоянного тока, а также выполняет роль кондиционера сети, повышая качество электроэнергии в точке подключения. Дизель-генераторная установка находится в отключенном состоянии.

Работа с дефицитом мощности ВЭУ и ФЭУ. В этом режиме нагрузка гибридного энергокомплекса 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 в режиме кондиционера сети. Для повышения эффективности ГЭК управление ФЭУ и ВЭУ осуществляется с учетом поиска и работы в точке максимальной мощности. ДГУ находится в отключенном состоянии.

ВЫВОДЫ

Научно-прикладная значимость проводимых исследований и разработок заключается в создании теоретически обоснованной методологии построения структурных схем гибридных энергокомплексов в диапазоне мощностей от 1 до 100 кВт (наиболее востребованном распределенными потребителями), разработке алгоритмов управления различными структурами ГЭК в разных погодно-климатических условиях и методики выбора силовых полупроводниковых преобразователей, осуществляющих это управление [5].

Интеллектуальные электроэнергетические комплексы с использованием ВИЭ позволяют обеспечивать надежным, бесперебойным энергоснабжением огромные территории РФ, не охваченные централизованным электроснабжением.

В то же время, при наличии в регионе размещения ГЭК линии электропередачи, разрабатываемая система управления ГЭК предусматривает возможность параллельной работы ГЭК с местной электросетью 380/220 В.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов Б.М., Баранов Н.Н. Универсальный преобразователь постоянного тока в постоянный. Патент РФ на полезную модель № 81013 от 27.02.2009.
2. Антонов Б.М., Баранов Н.Н. Преобразователь постоянного тока в постоянный с магнитно-связанными индуктивностями. Патент РФ на полезную модель № 89786 от 10.12.2009.
3. Антонов Б.М., Баранов Н.Н. Преобразователь постоянного тока в постоянный ток. Патент РФ на полезную модель № 102439 от 27.02.2011.
4. Баранов Н.Н. Нетрадиционные источники и методы преобразования энергии. М., Изд. дом МЭИ, 2012 г., 386 с.
5. Антонов Б.М., Баранов Н.Н., Крюков К.В., Розанов Ю.К. Гибридная система децентрализованного электроснабжения, реализуемая на основе возобновляемых источников энергии разных видов. // Электричество. 2018. № 1. С. 8–13.

Development of a Control System for a Hybrid Electric Power Complex, Which Includes Non-Traditional and Renewable Energy Sources of Various Types

N. N. Baranov^{a, *} and K. V. Kryukov^{b, **}

^aJoint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^bNational Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia

*e-mail: nsmppve@iht.mpei.ac.ru

**e-mail: jun7@yandex.ru

An urgent scientific and practical problem of modern energy is being solved, aimed at the development of universal hybrid electric power complexes based on non-traditional and renewable energy sources of various types.

Keywords: hybrid power plant, automatic control system, operating mode algorithms