

УДК 004.89

Композиционное гибридное моделирование автономных комплексных энергетических систем

Борисов В. В., Дли М. И., Синявский Ю. В., Федулов А. С.

Постановка задачи: особую важность для удаленных, прежде всего, арктических, районов Российской Федерации имеют автономные энергетические системы, включающие в себя возобновляемые источники энергии, такие как ветрогенерирующие установки, фотоэлектрические установки, мини-гидроэлектростанции. Одной из основных проблем, препятствующих широкому внедрению таких энергетических систем, является существенная вариативность системных и внешних факторов, приводящая к большой нестабильности генерации электрической энергии. Для решения этой проблемы создаются автономные комплексные энергетические системы (АКЭС), включающие в себя, помимо установок на основе возобновляемых источников энергии, дизель-генераторные установки и системы накопления энергии. Для эффективной работы АКЭС необходимо обеспечение баланса между выработкой энергии, ее потреблением и уровнем энергии в накопителях. Однако это осложнено особенностями таких систем и внешними факторами, позволяющими обосновать целесообразность комбинирования различных подходов и методов для построения композиционных моделей АКЭС с целью повышения эффективности управления такими системами. При этом необходимо предусмотреть создание композиционных гибридных моделей АКЭС, учитывающих специфику разработки, обучения и взаимодействия разнотипных компонентных моделей. **Целью работы** является разработка и исследование композиционной гибридной модели АКЭС, а также процедуры ее построения и мониторинга. **Используемые методы:** решение задач композиционного гибридного моделирования АКЭС основывается на использовании методов системного анализа, построения, обучения и использования нейросетевых, нечетко-логических, нейро-нечетких, нечетко-нейросетевых компонентных моделей, на методах математической статистики. **Новизна** заключается в том, что предлагается композиционная гибридная модель АКЭС, включающая в себя компонентные модели различного типа (аналитические модели с четкими и нечеткими параметрами, нейросетевые, нечетко-логические, нейро-нечеткие, нечетко-нейросетевые компонентные модели), а также процедура ее построения и мониторинга состояния АКЭС в процессе моделирования и функционирования. **Результат:** предлагаемая композиционная гибридная модель АКЭС и процедура ее построения используются для решения интеллектуального моделирования и управления АКЭС. **Практическая значимость** полученных результатов заключается в повышении точности моделирования АКЭС для повышения эффективности управления такими системами.

Ключевые слова: автономные комплексные энергетические системы, композиционное гибридное моделирование, интеллектуальные модели.

Введение

В настоящее время активно развиваются автономные энергетические системы, включающие в себя возобновляемые источники энергии (ВИЭ), такие как ветрогенерирующие установки, фотоэлектрические установки, мини-гидроэлектростанции (мини-ГЭС). Особую важность эти системы представля-

Библиографическая ссылка на статью:

Борисов В. В., Дли М. И., Синявский Ю. В., Федулов А. С. Композиционное гибридное моделирование автономных комплексных энергетических систем // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 1-37. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-1-37

Reference for citation:

Borisov V. V., Dli M. I., Sinyavsky Yu. V., Fedulov A. S. Composite hybrid modeling of autonomous integrated energy systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 4, pp. 1-37 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-1-37

ют для удаленных, прежде всего, арктических, районов Российской Федерации, где отсутствует возможность подключения потребителей непосредственно к сетям распределения электрической энергии. Одной из основных проблем, препятствующей широкому внедрению таких энергетических систем, является существенная вариативность системных и внешних факторов, приводящая к большой нестабильности генерации электрической энергии. Для решения этой проблемы создаются автономные комплексные энергетические системы (АКЭС), включающие в себя помимо установок на основе возобновляемых источников энергии дизель-генераторные установки и системы накопления энергии (как кинетические, так и на базе Li-Ion аккумуляторов). Для эффективной работы АКЭС необходимо обеспечение баланса между выработкой энергии, ее потреблением и уровнем энергии в накопителях. Однако это осложнено следующими факторами:

- генерация энергии возобновляемыми источниками характеризуется короткопериодическими колебаниями с большой амплитудой и с тенденцией к изменению средних значений вследствие изменения метеорологических условий (скорости и направления ветра, средней температуры, мощности инсоляции, степени облачности);
- наличие потребителей разной приоритетности (технологическое оборудование, вспомогательное оборудование, бытовое потребление), при этом характер потребления изменяется во времени (например, бытовое потребление определяется метеорологическими факторами);
- генерирующие мощности в процессе эксплуатации могут снижать выработку электроэнергии из-за воздействия факторов окружающей среды (например, запыления поверхности фотоэлектрических установок), а также выходить из строя на различные промежутки времени;
- особенности работы Li-Ion накопителей энергии накладывают ограничения на максимальный и минимальный запас энергии в них, а также на количество циклов глубокого заряда/разряда.

Помимо этого, особенностями таких АКЭС являются:

- нелинейная взаимозависимость между количественно и качественно задаваемыми параметрами;
- неполнота исходных данных, сложность и затратность проведения экспериментов, риски возникновения опасных ситуаций и их негативные последствия;
- сложность транслирования накапливаемого опыта на аналогичные системы; разнообразие воздействий внутренних и внешних факторов на АКЭС, их стохастический и нестохастический характер;
- изменение структуры и параметров в процессе функционирования АКЭС.

Свойства АКЭС, особенности их моделирования позволяют обосновать целесообразность комбинирования различных подходов и методов для построения композиционной модели АКЭС из моделей отдельных ее компонентов.

При этом необходимо предусмотреть создание композиционных гибридных моделей АКЭС, учитывающих специфику разработки, обучения и взаимодействия разнотипных компонентных моделей.

С другой стороны, особенностями управления АКЭС для удаленных регионов РФ, которые также необходимо учитывать при их анализе и композиционном моделировании, являются:

- невозможность непосредственного управления со стороны оператора;
- управление представляет собой выработку и реализацию различных последовательностей управляющих решений по переходу в целевую ситуацию в зависимости от стратегии управления;
- неполнота и неопределенность данных, сложность формализации критериев эффективности управления затрудняет реализацию различных стратегий и достижение цели управления АКЭС;
- выполнение дополнительных требований при переходе через промежуточные состояния; ошибки управления могут привести к выходу из строя АКЭС, к аварийным ситуациям и к негативным последствиям;
- необходимость адаптации управления к изменению структуры и параметров в процессе функционирования АКЭС, системных и внешних факторов.

Вышесказанное позволяет обосновать актуальность разработки и исследования интеллектуального методов и средств анализа и композиционного гибридного моделирования АКЭС для повышения эффективности управления такими системами.

1. Анализ автономных комплексных энергетических систем

1.1. Состав АКЭС

В Российской Федерации можно выделить несколько удаленных районов, энергоснабжение которых имеет существенные особенности. Так, в арктических районах производственно-хозяйственная деятельность ведется в условиях отсутствия центрального электроснабжения, так как стоимость 1 кВтч электрической энергии существенно выше, чем в центральных районах [1]. Данный фактор сдерживает экономическое развитие региона, так как приводит к существенному росту составляющей энергоресурсов в себестоимости продукции, что делает ее не конкурентоспособной.

Вторым аспектом экономической деятельности в удаленных и арктических районах является необходимость в обеспечении деятельности относительно небольших организаций и предприятий, осуществляющих сезонную деятельность в районах, в которых централизованное энергоснабжение принципиально невозможно. К такого рода деятельности следует отнести: геологоразведку, промысел животных и растений, оленеводство, ремонтные работы и обслуживание железных и автомобильных дорог.

Энергоснабжение указанной выше деятельности является актуальной задачей. Одним из способов ее решения является разработка и внедрение АКЭС, способных к автономному покрытию энергопотребления. Учитывая, что элек-

трогенерация на основе только традиционных источников энергии требует решения логистических задач доставки топлива, что не всегда возможно и экономически целесообразно в удаленных районах, в состав АКЭС должны входить генерирующие мощности на основе ВИЭ, к которым, прежде всего, относятся ветрогенерирующие установки (ВГУ) и фотоэлектрические установки (ФЭУ).

Так как одной из основных особенностей электрогенерации с использованием ВИЭ является существенное колебание выработки в зависимости от времени суток (для ФЭУ) и погодных условий (как для ФЭУ, так и для ВГУ), целесообразно использование нескольких типов генерации, с обязательным включением в качестве резервного и стабилизирующего источника энергии дизель-генераторной установки (ДГУ).

В общем случае, АКЭС включает в себя взаимодействующие подсистемы:

- генерации электроэнергии;
- накопления и хранения электроэнергии;
- распределения электроэнергии;
- управления.

В целом, концепция мобильных комбинированных источников электро-снабжения, использующих ВИЭ, достаточно известна [2]. Зарегистрирован ряд объектов интеллектуальной собственности, например, [3, 4]. Однако, как правило, не рассматриваются массогабаритные ограничения на основное и вспомогательное оборудование АКЭС. Особенностью ВИЭ является теоретическая возможность обеспечения любой мощности генерации за счет экстенсивного увеличения размеров и количества ВГУ и ФЭУ, что создает неверное представление о возможности неограниченного обеспечения различных по назначению и мощности потребления объектов. В то же время, массогабаритные ограничения играют существенную роль, влияя на обоснование параметров генерирующих устройств.

Для их оценки в работе принято, что носителем АКЭС является стандартный фургон К4.5350 на базе автомобиля КАМАЗ, имеющий массогабаритные параметры, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры фургона К4.5350,
используемого в качестве носителя АКЭС

Параметр	Значение
Длина наружная	9120 мм
Ширина наружная	2550 мм
Высота наружная	3370 мм
Длина внутренняя	5100 мм
Ширина внутренняя	2440 мм
Высота внутренняя	1800 мм
Масса перевозимого груза	5770 кг

Состав АКЭС, в общем случае, определяется энергетическими потребностями объектов, потенциалом источников энергии, особенностями конструкции носителя. Например, анализ потребностей электрической энергии в ходе геологоразведочных работ показывает, что потребляемая мощность (без учета проведения буровых работ) составляет около 15-20 кВт [1].

1.2. Подсистема генерации АКЭС

1.2.1. Ветрогенерирующие установки

Целесообразность включения ВГУ в состав АКЭС обусловлено достаточно высоким ветровым потенциалом удаленных арктических районов России. Как показано на рис. 1, для районов Крайнего Севера и значительной части районов Дальнего Востока характерна средняя скорость ветра 8 м/с и выше, что делает ВГУ экономически целесообразным источником энергии.

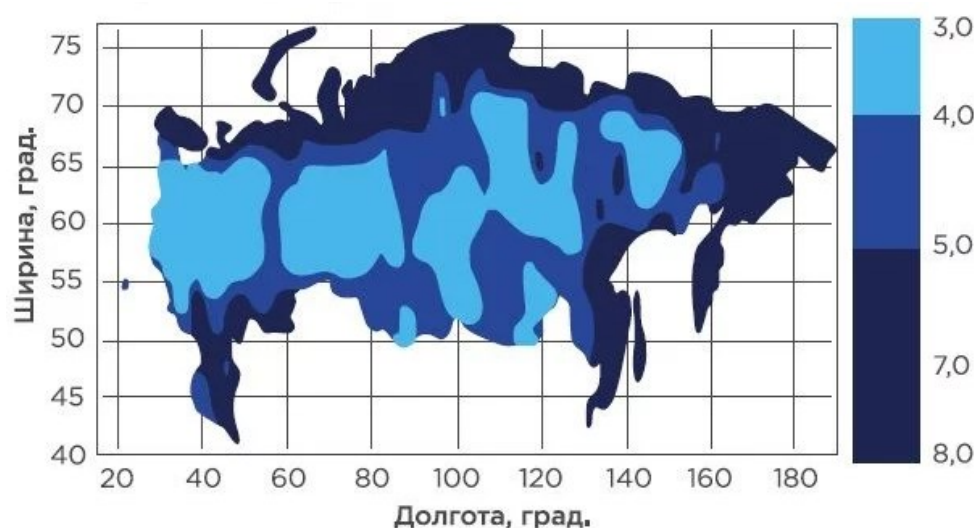


Рис. 1. Распределение ветрового потенциала на территории Российской Федерации

В настоящее время имеется ряд мобильных ВГУ, выполненных как на самоходном шасси, так и в виде буксируемого прицепа [5]. Выбор конкретного типа ВГУ обусловлен ветровыми условиями – для районов с большим ветровым потенциалом наиболее эффективным решением является использование горизонтальных ВГУ, а для районов с небольшой скоростью ветра (к которым относятся районы центральной Сибири) – вертикальных. При этом следует учитывать, что ряд высокоэффективных вертикальных ВГУ, основанных на рабочих элементах типа «Ротор Дарье», «Ротор Савониуса», имеют сложную форму и занимают большой объем, так как не могут быть разобраны на составные элементы, или такая разборка с последующей сборкой на месте является трудоемкой задачей. В то же время, горизонтальные ВГУ в транспортном состоянии достаточно компактны, так как их лопасти могут отделяться или складываться, а мачтовые конструкции, как правило, представляют собой секционированные трубчатые системы.

Интерес представляют универсальные устройства, допускающие изменение ориентации оси вращения. Пример такого ВГУ описан в [6].

В настоящее время имеются мобильные ВГУ с номинальной мощностью до 10 кВт [7]. Однако, учитывая представленные выше параметры носителя АКЭС, предпочтительным является использование горизонтальных ВГУ с диаметром ротора до 2 м с номинальной мощностью 0,4-0,6 кВт. Такие устройства имеют массу до 50 кг и могут размещаться на мачтовых устройствах высотой до 10 м, собираемых из стандартных секций длиной 2,5-3 м.

Указанная мощность недостаточна для покрытия потребления, поэтому целесообразно включение в состав АКЭС нескольких ВГУ, что положительно сказывается и на общей надежности системы генерации, так как выход из строя одной из ВГУ не будет являться критическим отказом для системы в целом.

1.2.2. Фотоэлектрические установки

Включение ФЭУ в состав АКЭС обусловлено достаточно благоприятными условиями солнечной освещенности, характерными для центральных районов Сибири и части Дальнего Востока. Распределение мощности инсоляции на территории Российской Федерации представлено на рис. 2.



Рис. 2. Распределение мощности инсоляции на территории Российской Федерации

Анализ показывает, что современные ФЭУ большой площади являются достаточно мобильными, так как могут выполняться складными. На рынке представлены ФЭУ, выполненные на базе автомобильных прицепов [8], а также на базе контейнеров общего назначения [9]. При этом, как правило, солнечные панели монтируются непосредственно на корпусе носителя по углам, обеспечивающим максимальную мощность генерации.

Учитывая указанные в таблице 1 наружные геометрические размеры носителя АКЭС, можно оценить рабочую площадь ФЭУ 15-20 м². Для повышения выработки электрической энергии, целесообразно использование солнечных панелей, выполненных на основе монокристаллических элементов, что обеспечивает номинальную мощность комплекса порядка 3 кВт.

Представленные на рынке солнечные панели такого типа имеют удельную массу порядка 11 кг/м² с учетом покрытия и несущих элементов [10], что дает общую массу солнечной панели АКЭС около 200 кг. К достоинствам солнечных панелей такого типа можно отнести возможность их сборки из отдельных секций, что упрощает транспортировку.

1.2.3. Мини-гидроэлектростанции

Одним из направлений развития ВИЭ является разработка мини-ГЭС, особенностью которых является возможность работы при низких скоростях движения воды [11]. Определенный интерес представляют мини-ГЭС с рабочим органом типа «крыло», использующих для генерации энергию волновых процессов на поверхности воды. Подобные источники энергии являются мобильными и не требуют создания водохранилищ для повышения уровня воды в водоеме. Учитывая, что потенциальными эксплуатантами АКЭС выступают рыболовецкие и рыбоводческие предприятия, представляется целесообразным использование мини-ГЭС в составе системы.

В качестве примера такого решения может быть рассмотрена мини-ГЭС типа «Акула» [12], предназначенная для работы в реках со скоростью течения от 0,7 до 3 м/с, с максимальной мощностью 3 кВт. Она имеет длину порядка 2 м и может транспортироваться во внутреннем объеме носителя АКЭС.

1.2.4. Дизель-генераторные установки

Учитывая существенную неравномерность генерации энергии с использованием только альтернативных источников, в состав АКЭС должна входить ДГУ. Анализ показывает, что для решения большинства задач АКЭС наиболее пригодны ДГУ с мощностью 8-10 кВт, имеющие массу около 200 кг.

1.3. Подсистема накопления энергии АКЭС

В настоящее время активно развиваются системы накопления энергии для взаимодействия с ВИЭ. Это связано с существенной переменностью мощности генерации, обусловленной погодными условиями и суточными циклами. Известны различные типы систем и средств накопления энергии [13]:

- электрохимические и проточные батареи;
- водородные системы;
- емкостные накопители (суперконденсаторные системы);
- индуктивные накопители;
- инерционные (кинетические) накопители;
- пневмо-воздушные системы;
- тепловые накопители;
- гравитационные накопители, в частности, гидронакопители.

Анализ показывает, что для АКЭС наиболее подходящими являются электрохимические накопители в виде аккумуляторных батарей (АКБ) на основе LiFePO₄, выполненные по модульной схеме. Такие модули имеют массу порядка 10 кг на 1 кВтч накопленной энергии при занимаемом объеме 0,012 м³. Учитывая приведенные в таблице 1 размеры носителя АКЭС, при использовании 10% объема возможно размещение АКБ емкостью до 100 кВтч.

Следует отметить, что наличие накопителя энергии делает возможным выход АКЭС на объект энергообеспечения с полностью заряженными АКБ, и реализацию выбранной стратегии энергообеспечения, при которой происходит плавное снижение заряда АКБ за счет превышения значения среднего потребления над средней генерацией. Для обеспечения данного процесса в состав оборудования АКЭС включен контроллер заряда АКБ от внешней сети (ВС).

1.4. Подсистема распределения энергии АКЭС

Потребители электроэнергии АКЭС разделены по критерию важности на три категории (см. таблицу 2). Это определяет целесообразность включения в состав АКЭС 3-х независимых управляемых инверторных преобразователей, предназначенных для обеспечения электроэнергией выделенных категорий потребителей. Такое решение обеспечивает возможность обеспечения баланса генерации и потребления при неблагоприятной ситуации за счет отключения части потребителей низкого приоритета.

Таблица 2 – Категории потребителей электрической энергии АКЭС

Категория потребителя	Состав потребителей	Характер потребления	
		Мощность потребления	График потребления
I-я категория	Технологическое оборудование для непосредственного осуществления хозяйственной деятельности	Известная, постоянная	Известный
II-я категория	Основное оборудование обеспечения жизнедеятельности	Известная, постоянная	Известный
III-я категория	Вспомогательное оборудование обеспечения жизнедеятельности	Неизвестная	Хаотический

Наиболее пригодными для использования в составе АКЭС являются инверторы МАС Dominator [14]. При подборе инверторных преобразователей требуется учет стартовой перегрузки, особенно в случае, если потребителями являются холодильные установки или воздушные компрессоры, поэтому целесообразно использование для каждой категории потребителей инверторов с мощностью не менее 9 кВт. Инверторы такого типа имеют массу 40 кг.

К элементам подсистемы распределения также относятся контроллеры, обеспечивающие согласование токов различных источников энергии при их параллельной работе на АКБ. Особенностью их работы является наличие соб-

ственной информационной связи при наличии одного из контроллеров как ведущего.

Рассмотренный набор средств генерации может быть размещен в рассматриваемом носителе, при этом остается значительный резерв массы и объема для размещения вспомогательного оборудования и топлива для ДГУ.

1.5. Подсистема управления АКЭС

1.5.1. Организация и требования к управлению АКЭС

Сводная информация о массе и занимаемом объеме основных компонентов АКЭС приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Сведения о массе и занимаемом объеме основных элементов АКЭС

Компонент АКЭС	Занимаемый объем, куб.м	Масса, кг
ВГУ	0,05	150
ФЭУ	0,05	300
АКБ	2	1000
Мини-ГЭС	1,85	110
ДГУ	0,45	200
Запас топлива из расчета непрерывной работы на 1 сутки	0,12	120
МАП (3 шт)	0,05	180
КЭС/КЭУ (3 шт)	0,025	25
Всего	4.7	2000
Использование объема/ полезной массы	23%	40%

Обобщенная структура АКУЭ, соответствующая предложенному набору компонентов, представлена на рис. 3.

С целью предварительной декомпозиции подсистемы управления АКУЭ в составе каждого из источников энергии выделены:

- блок управления (контроллер);
- блок преобразования энергии (БПЭ), осуществляющий преобразование энергии, непосредственно генерируемой источником, к параметрам, необходимым для заряда АКБ.

Подсистема управления АКЭС является аппаратно-программным комплексом, обеспечивающим определение оптимальных параметров работы АКЭС с использованием данных, поступающих от датчиков, входящих в состав генерирующих и вспомогательных устройств, и формирующей команды управления для различных элементов системы.

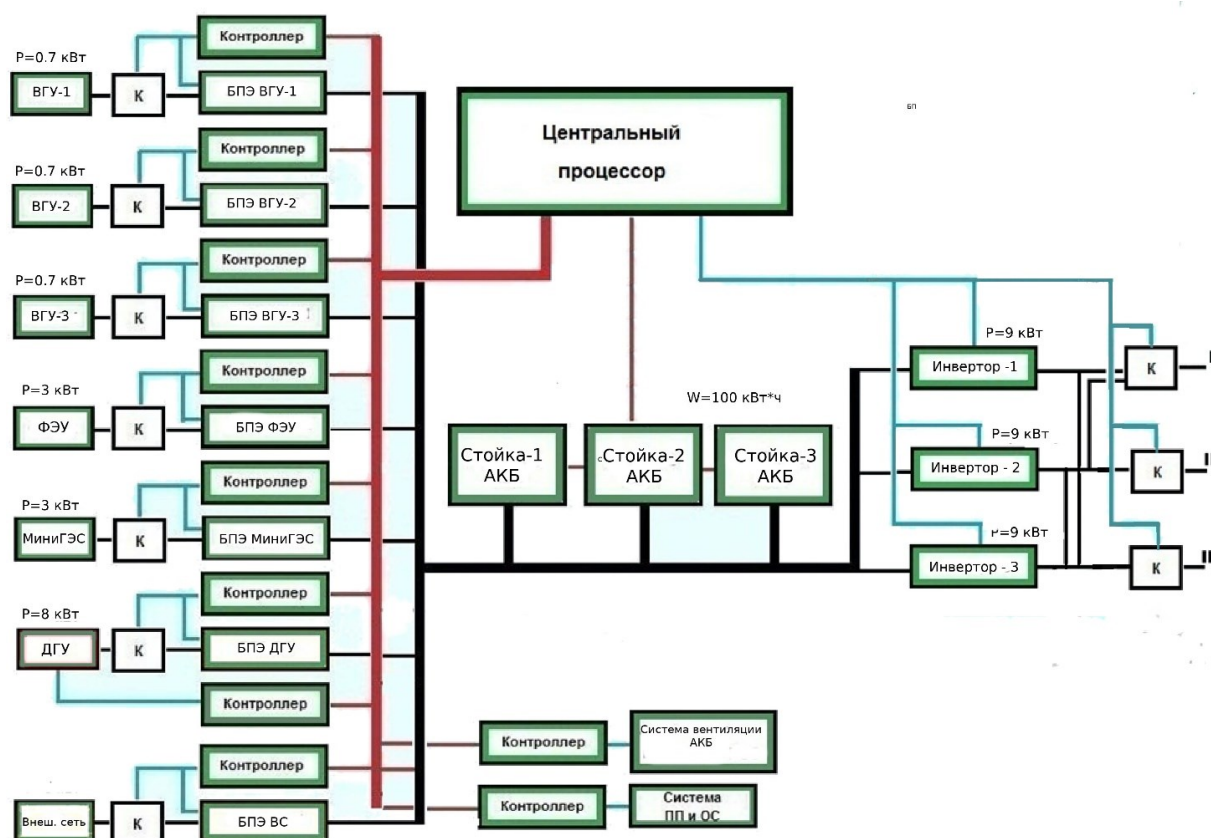


Рис. 3. Обобщенная схема АКЭС

Целью подсистемы управления является обеспечение эффективного и безопасного функционирования АКЭС. Подсистема управления АКЭС решает следующие основные задачи:

- обеспечение функционирования АКЭС в соответствии с планом потребления в заданных погодных условиях при минимальном участии обслуживающего персонала;
- управление включением и отключением объектов управления КЭУ с учетом их технического состояния, погодных условий, состояния накопителя и плана потребления электрической энергии;
- формирование плана генерации электрической энергии;
- формирование плана потребления электрической энергии;
- оценка технического состояния объектов управления и АКЭС в целом;
- формирование предупредительных и аварийных сигналов при выходе технических параметров объектов управления АКЭС за пределы нормального функционирования;
- формирование рекомендаций пользователю по разрешению конфликтных и предаварийных ситуаций;
- сбор, накопление диагностической информации;
- отображение формируемых команд управления;
- сбор, накопление информации о фактической погоде;
- сбор, накопление основной информации о параметрах функционирования объектов АКЭС;

- управление системой вентиляции модулей накопителей электрической энергии.

Управляющим объектом в системе является аппаратно-программный модуль управления энергией и диагностики АКЭС (АПМ-УЭД-АКЭС), который включает в себя информационно-вычислительные средства и специальное программное обеспечение.

Специальное программное обеспечение АПМ-УЭД-АКЭС состоит из программных модулей:

- управления энергией;
- управления диагностикой;
- хранения данных о работе объектов;
- интерфейса пользователя.

Объектами управления АКЭС являются:

- блоки преобразования энергии от ВЭУ, ФЭУ, мини-ГЭС, ДГУ;
- блоки коммутации источников энергии;
- блоки инверторов;
- блоки коммутации по цепям нагрузки.

Взаимодействующими объектами являются:

- система обогрева и вентиляции отсека АКБ;
- система противопожарной и охранной сигнализации;
- система удаленного доступа.

Каждый объект управления АКЭС оснащается контроллером, который принимает и реализует команды управления, а также выдает необходимую информацию о состоянии и параметрах функционирования объекта. Контроллеры также обеспечивают самодостаточность объектов, что позволяет реализовать их работу в автономном режиме.

Каждый взаимодействующий объект, оснащенный контроллером, обеспечивает АПМ-УЭД-АКЭС информацией о состоянии и параметрах функционирования объекта.

Модуль удаленного доступа обеспечивает выдачу информации о состоянии и функционировании АКЭС удаленному пользователю (системе), позволяет дистанционно вводить план потребления электроэнергии и прогноз погоды, а также выводить диагностическую информацию и данные о параметрах функционирования объекта.

Обмен данными между центральным процессором и контроллерами осуществляется по шине RS-48 в соответствии с протоколом обмена Modbus RTU.

Обмен данными с микроконтроллерами инверторов организуется по шине RS-232 через модуль удаленного доступа (роутер).

Каждый объект управления АКЭС для обеспечения работы в автономном режиме должен быть оснащен местным пультом управления, позволяющий оператору переводить объект из дистанционного в автономный или ручной режим управления.

В части диагностики подсистема управления АКЭС должна обеспечивать непрерывный контроль технического состояния объектов АКЭС, выявление и индикацию аварийных и предотказных состояний.

АПМ-УЭД-АКЭС должен обеспечивать самодиагностику и контроль состояния каналов обмена информацией с контроллерами.

Контроль состояния объектов АКЭС реализуется контроллерами объектов по данным от преобразователей, датчиков и микроконтроллеров.

Наиболее важные объекты для предотвращения аварийных ситуаций должны быть оснащены дополнительными узлами защиты [15].

В зависимости от комплектации АКЭС первичными ВИЭ, структура системы управления энергией и диагностики может изменяться.

1.5.2. Управление преобразованием электрической энергии ВЭУ

Блок БПЭ от ВЭУ является регулируемым источником тока с входным 3-фазным напряжением переменного тока и выходным напряжением 56 В в режиме стабилизации напряжения с отбором максимальной мощности от ВЭУ.

Блок БПЭ должен обеспечивать безопасность генератора ВЭУ. Должна быть обеспечена возможность отключения модуля от генератора ВЭУ и сброса мощности генератора на балластную нагрузку.

Для обеспечения сбора информации о входных и выходных физических параметрах, состоянии и режиме работы блок должен иметь контроллер. На вход этого контроллера от аналогово-цифровых преобразователей поступает следующая информация:

- значение напряжения на входе преобразователя;
- значение тока на входе преобразователя;
- значение напряжения на выходе преобразователя;
- значение тока на выходе преобразователя;
- температура силового модуля преобразователя;
- значения ветра с выхода микроконтроллера датчика скорости ветра, установленного на ВЭУ.

В результате обработки информации с датчиков и аналогово-цифровых преобразователей в контроллере формируются:

- сигнал управления входным коммутатором;
- сигналы предупредительной и аварийной сигнализации по входному току и напряжению;
- сигналы предупредительной и аварийной сигнализации по выходному току и напряжению;
- сигналы предупредительной и аварийной сигнализации по температуре модуля силового блока;
- обобщенный сигнал предупредительной и аварийной сигнализации;
- режим работы преобразователя;
- состояние блока преобразования энергии.

По сигналам запроса в АПМ-УЭД-КЭУ по шине данных передаются:

- значение напряжения на входе преобразователя;
- значение тока на входе преобразователя;
- значение напряжения на выходе преобразователя;
- значение тока на выходе преобразователя;
- температура силового модуля преобразователя;

- обобщенный сигнал предупредительной и аварийной сигнализации;
- режим работы преобразователя;
- значение скорости ветра;
- состояние блока преобразования энергии.

С АПМ-УЭД-АКЭС в контроллер поступают:

- код для изменения состояния преобразователя;
- сигнал для внеочередного запроса данных.

1.5.3. Управление преобразованием электрической энергии ФЭУ

Блок БПЭ от ФЭУ является регулируемым источником тока с входным напряжением постоянного тока и выходным напряжением 56 В в режиме стабилизации напряжения с функцией отбора максимальной мощности от ФЭУ.

Этот блок должен обеспечивать безопасность ФЭУ. Должна быть обеспечена возможность отключения блока от ФЭУ.

Для сбора информации о входных и выходных физических параметрах, состоянии и режиме работы блок должен иметь контроллер. На вход этого контроллера от аналогово-цифровых преобразователей поступает следующая информация:

- значение напряжения на входе преобразователя;
- значение тока на входе преобразователя;
- значение напряжения на выходе преобразователя;
- значение тока на выходе преобразователя;
- температура силового модуля преобразователя;
- значения солнечной инсоляции с выхода микроконтроллера датчика освещенности, установленной на панели ФЭУ.

В результате обработки информации с датчиков и аналого-цифровых преобразователей в контроллере формируются:

- сигналы управления входным коммутатором;
- сигналы предупредительной и аварийной сигнализации по входному току и напряжению;
- сигналы предупредительной и аварийной сигнализации по выходному току и напряжению;
- сигналы предупредительной и аварийной сигнализации по температуре модуля силового блока;
- обобщенный сигнал предупредительной и аварийной сигнализации;
- режим работы преобразователя;
- состояние БПЭ.

По сигналам запроса в АПМ-УЭД-АКЭС по шине данных передаются:

- значение напряжения на входе преобразователя;
- значение тока на входе преобразователя;
- значение напряжения на выходе преобразователя;
- значение тока на выходе преобразователя;
- температура силового модуля преобразователя;
- обобщенный сигнал предупредительной и аварийной сигнализации;
- режим работы БПЭ;

- значения солнечной инсоляции с выхода микроконтроллера датчика освещенности, установленной на панели ФЭУ;
 - состояние блока преобразования энергии.
- С АПМ-УЭД-АКЭС в контроллер поступают:
- код для изменения состояния преобразователя;
 - сигнал для внеочередного запроса данных.

1.5.4. Управление преобразованием электрической энергии от мини-ГЭС

Блок БПЭ от мини-ГЭС является регулируемым источником тока с входным 3-фазным напряжением переменного тока и выходным напряжением 56 В в режиме стабилизации напряжения с функцией отбора максимальной мощности от мини-ГЭС.

Блок должен обеспечивать безопасность мини-ГЭС с возможностью отключения модуля от мини-ГЭС и сброса мощности генератора на балластную нагрузку.

Для обеспечения сбора информации о входных и выходных физических параметрах, состоянии и режиме работы блок должен иметь контроллер. На вход контроллера от аналогово-цифровых преобразователей поступает следующая информация:

- значение напряжения на входе преобразователя;
- значение тока на входе преобразователя;
- значение напряжения на выходе преобразователя;
- значение тока на выходе преобразователя;
- температура силового модуля преобразователя;
- значения скорости воды с выхода микроконтроллера датчика потока, установленной на панели мини-ГЭС.

В результате обработки информации с датчиков и аналого-цифровых преобразователей в контроллере формируются:

- сигналы управления входным коммутатором;
- сигналы предупредительной и аварийной сигнализации по входному току и напряжению;
- сигналы предупредительной и аварийной сигнализации по выходному току и напряжению;
- сигналы предупредительной и аварийной сигнализации по температуре модуля силового блока;
- обобщенный сигнал предупредительной и аварийной сигнализации;
- режим работы преобразователя;
- состояние блока преобразования энергии.

По сигналам запроса в АПМ-УЭД-АКЭС по шине данных передаются:

- значение напряжения на входе преобразователя;
- значение тока на входе преобразователя;
- значение напряжения на выходе преобразователя;
- значение тока на выходе преобразователя;
- температура силового модуля преобразователя;

- обобщенный сигнал предупредительной и аварийной сигнализации;
- режим работы преобразователя;
- значения скорости воды с выхода микроконтроллера датчика потока, установленной на мини-ГЭС;
- состояние БПЭ.

С АПМ-УЭД-АКЭС в контроллер поступают:

- код для изменения состояния преобразователя;
- сигнал для внеочередного запроса данных.

1.5.5. Управление преобразованием электрической энергии от ДГУ

Блок БПЭ от ДГУ является регулируемым источником тока с входным однофазным напряжением от 176 В до 264 В переменного тока промышленной частоты и выходным напряжением 56 В постоянного тока в режиме стабилизации напряжения с функцией отбора максимальной мощности от генератора ДГУ.

Блок должен обеспечивать безопасность ДГУ. Должна быть обеспечена возможность отключения модуля от ДГУ.

Для обеспечения сбора информации о входных и выходных физических параметрах, состоянии и режиме работы блок должен иметь контроллер, на вход которого от аналогово-цифровых преобразователей поступает следующая информация:

- значение напряжения на входе преобразователя;
- значение тока на входе преобразователя;
- значение напряжения на выходе преобразователя;
- значение тока на выходе преобразователя;
- температура силового модуля преобразователя.

В результате обработки информации с датчиков и аналого-цифровых преобразователей в контроллере формируются:

- сигналы управления входным коммутатором;
- сигналы предупредительной и аварийной сигнализации по входному току и напряжению;
- сигналы предупредительной и аварийной сигнализации по выходному току и напряжению;
- сигналы предупредительной и аварийной сигнализации по температуре модуля силового блока;
- обобщенный сигнал предупредительной и аварийной сигнализации;
- режим работы преобразователя;
- состояние блока преобразования энергии.

По сигналам запроса в АПМ-УЭД-АКЭС по шине данных передаются:

- значение напряжения на входе преобразователя;
- значение тока на входе преобразователя;
- значение напряжения на выходе преобразователя;
- значение тока на выходе преобразователя;
- температура силового модуля преобразователя;
- обобщенный сигнал предупредительной и аварийной сигнализации;
- режим работы преобразователя;

- состояние блока преобразования энергии.
- С АПМ-УЭД-АКЭС в контроллер поступают:
- код для изменения состояния преобразователя;
 - сигнал для внеочередного запроса данных.

Дизель-генераторная установка мощностью 8 кВт является резервным источником питания для накопителя электрической энергии.

В состав ДГУ входят:

- дизельный двигатель;
- генератор;
- система предпускового подогрева ДГУ при отрицательных температурах окружающей среды;
- система подачи и фильтрации воздуха для работы двигателя;
- система отвода отработавших газов;
- система охлаждения двигателя;
- система управления и контроля ДГУ.

Система управления и контроля ДГУ включает в себя контроллер управления, обеспечивающий управление работой ДГУ во всех режимах, измерение параметров ДГУ, передачу информации на панель управления, получение управляющих сигналов с панели управления, передачу и прием информации с АПМ-УЭД-АКЭС. При функционировании контроллер ДГУ с заданной периодичностью должен представлять следующую информацию в АПМ-УЭД-АКЭС:

- напряжение на выходе генератора;
- ток на выходе генератора;
- мощность активная на выходе генератора;
- уровень топлива в баке;
- уровень заряда АКБ;
- температура охлаждающей жидкости;
- режим управления ДГУ;
- состояние ДГУ;
- готовность к запуску;
- сигнал предупредительной и аварийной сигнализации по току и напряжению на выходе генератора;
- сигнал предупредительной и аварийной сигнализации по двигателю.

Для дистанционного управления работой по шине данных в контроллер поступают с АПМ-УЭД-АКЭС:

- команды управления состоянием (старт/стоп) дизельного двигателя;
- команды на заряд АКБ двигателя;
- запрос о внеочередном представлении данных о техническом состоянии и основных параметрах функционирования ДГУ.

1.5.6. Управление преобразованием электроэнергии от внешней сети

Блок БПЭ от внешней сети является регулируемым источником тока с входным однофазным напряжением от 176 В до 264 В переменного тока промышленной частоты и выходным напряжением 56 В постоянного тока в режи-

ме стабилизации напряжения с функцией отбора заданной мощности от внешней сети.

Блок должен обеспечивать безопасность от внешней сети. Должна быть обеспечена возможность подключения/отключения блока от внешней сети.

Для обеспечения сбора информации о входных и выходных физических параметрах, состоянии и режиме работы блок должен иметь контроллер. На вход контроллера от аналогово-цифровых преобразователей поступает следующая информация:

- значение напряжения на входе преобразователя;
- значение тока на входе преобразователя;
- значение напряжения на выходе преобразователя;
- значение тока на выходе преобразователя;
- температура силового модуля преобразователя.

В результате обработки информации с датчиков и аналого-цифровых преобразователей в контроллере формируются:

- сигналы управления входным коммутатором;
- сигналы предупредительной и аварийной сигнализации по входному току и напряжению;
- сигналы предупредительной и аварийной сигнализации по выходному току и напряжению;
- сигналы предупредительной и аварийной сигнализации по температуре модуля силового блока;
- обобщенный сигнал предупредительной и аварийной сигнализации;
- режим работы преобразователя;
- состояние блока преобразования энергии.

По сигналам запроса в АПМ-УЭД-АКЭС по шине данных передаются:

- значение напряжения на входе преобразователя;
- значение тока на входе преобразователя;
- значение напряжения на выходе преобразователя;
- значение тока на выходе преобразователя;
- температура силового модуля преобразователя;
- обобщенный сигнал предупредительной и аварийной сигнализации;
- режим работы преобразователя;
- состояние блока преобразования энергии.

С АПМ-УЭД-АКЭС в контроллер поступают:

- код для изменения состояния преобразователя;
- сигнал для внеочередного запроса данных.

1.5.7. Управление накоплением электрической энергии

Модули накопителей является самодостаточными и не требует внешних команд для управления функционированием. Каждый модуль включает в свой состав микроконтроллер. Связь с внешними устройствами для контроля технического состояния и основных параметров функционирования осуществляется по шине данных RS-485.

Для управления накопителями и диагностики АПМ-УЭД-АКЭС использует следующую информацию с выхода микроконтроллера модулей:

- техническое состояние модуля;
- уровень заряда;
- температура АКБ модуля.

1.5.8. Управление вентиляцией модулей накопителей

Система вентиляции модулей АКБ обеспечивает одинаковый температурный режим для всех модулей. Контроллер системы вентиляции должен включать/выключать вентиляторы по команде АПМ-УЭД-АКЭС. Техническое состояние вентилятора(ов) контроллер определяет по показаниям аэродатчиков или по изменению потребляемой мощности. Обмен информацией контроллера с АПМ-АКЭС осуществляется по шине данных RS-485.

От АПМ-УЭД-КЭУ поступает информация:

- включить/отключить вентилятор(ы) обдува модулей;
- запрос о внеочередном представлении данных о техническом состоянии.

От контроллера поступает информация о состоянии вентилятора(ов) обдува модулей.

1.5.9. Управление преобразованием энергии по цепям нагрузки

Инверторы MАС Dominator не требуют внешних команд для управления. Каждый инвертор имеет в своем составе миникомпьютер. Связь с центральным компьютером для контроля технического состояния и основных параметров функционирования осуществляется через роутер (маршрутизатор).

Для управления энергией и диагностики АПМ-УЭД-АКЭС использует следующую информацию с выхода миникомпьютера инвертора:

- техническое состояние инвертора;
- мощность электроэнергии на выходе инвертора;
- температура силового модуля.

От АПМ-УЭД-АКЭС поступают управляющие команды:

- включить/отключить инвертор;
- запрос о внеочередном представлении данных о техническом состоянии.

1.5.10. Управление коммутаторами выходной цепи

Выходные коммутаторы (К) предназначены для распределения электроэнергии, поступающей с выходов инверторов, потребителям в соответствии приоритетами. Задача контроллера выходного коммутатора – подключать/отключать выходные силовые шины к выходам инверторов по командам, поступающим от АПМ-УЭД-АКЭС.

Управляющие команды от АПМ-УЭД-АКЭС обеспечивают:

- подключение силовой шины 1-го приоритета к выходу 1-го инвертора;
- подключение силовой шины 2-го приоритета к выходу 2-го инвертора;

- подключение/отключение силовой шины 2-го приоритета к выходу 2-го инвертора;
- подключение/отключение силовой шины 3-го приоритета к выходу 3-го инвертора;
- подключение/отключение 3-фазной силовой шины к выходам инверторов.

Важно отметить, что сложные динамические сценарии генерации и потребления делает необходимым разработку интеллектуальных методов управления, позволяющих не только анализировать текущее состояние АКЭС и реагировать на процессы в реальном масштабе времени, но и осуществлять прогнозирование состояния АКЭС [16-18]. На основании прогнозирования состояния отдельных компонентов АКЭС должна быть обеспечена возможность формирования и реализации различных стратегий управления, наилучшим образом обеспечивающих рабочие режимы АКЭС.

2. Подход к композиционному гибриднему моделированию автономных комплексных энергетических систем

2.1. Постановка задачи

На основе результатов исследования АКЭС сформулируем постановку задачи композиционного гибридного моделирования АКЭС.

Пусть выполнена декомпозиция АКЭС на совокупность взаимосвязанных компонентов:

$$\{Comp_1, \dots, Comp_N\},$$

где $Comp_n$ – n -й компонент АКЭС, $n = 1, \dots, N$.

Обоснована совокупность значимых признаков компонентов АКЭС, и определены их значения:

$$R = \{R_1, \dots, R_I\}, \quad R_i = \{R_{i,1}, \dots, R_{i,m_i}\},$$

где R_i – i -й признак компонентов АКЭС; $\{R_{i,1}, \dots, R_{i,m_i}\}$ – набор значений R_i .

Каждому компоненту АКЭС сопоставляются группы требований:

$$\forall Comp_n : G_n = \{G_{n,1}, \dots, G_{n,K_n}\},$$

$$G_{n,k_n} = \{R_{i,m_i} \mid i = 1, \dots, I, R_{i,m_i} \in R_i\}, k_n = 1, \dots, K_n,$$

где G_n – совокупность групп требований со стороны n -го компонента АКЭС; G_{n,k_n} – группа требований со стороны n -го компонента АКЭС.

Требуется:

- определить типы компонентных моделей для анализа и моделирования компонентов АКЭС:

$$\{MComp_1, \dots, MComp_P\},$$

где $MComp_p$ – p -й тип компонентных моделей, $p = 1, \dots, P$;

- обосновать выбор компонентных моделей для композиционной гибридной модели АКЭС по результатам сопоставления групп требований к компонентным моделям со стороны компонентов АКЭС:

$$\forall Comp_n : Mcomp_l^p \in Mcomp_p,$$

где $Mcomp_l^p$ – l -я компонентная модель p -го типа, удовлетворяющая требованиям n -го компонента АКЭС;

- выполнить мониторинг состояния АКЭС, осуществить ее структурно-параметрическую настройку и, при необходимости изменить типы соответствующих компонентных моделей для обеспечения требуемой точности моделирования как для отдельного компонента АКЭС.

2.2. Процедура композиционного гибридного моделирования АКЭС

2.2.1. Этапы композиционного гибридного моделирования АКЭС

Основными задачами моделирования АКЭС является: ее покомпонентная декомпозиция с учетом энергетических потоков; обоснование типов и разновидностей компонентных моделей; разработка композиционной модели АКЭС; структурно-параметрическая настройка и адаптация как компонентных моделей, так и композиционной модели АКЭС в целом [19-23].

При этом необходимо осуществлять непрерывный анализ энергетического баланса генерации и потребления с учетом накопленной энергии и ресурса топлива. Решение данной задачи требует создания «цифрового двойника» АКЭС с последующим использованием его для прогнозирования состояний АКЭС с учетом переменных параметров внешней среды.

С учетом требований, а также постановки задачи предлагаются следующие этапы процедуры композиционного гибридного моделирования АКЭС:

- обобщение и анализ информации об АКЭС;
- построение структурной модели АКЭС;
- обоснование компонентов АКЭС и определение значимых показателей;
- обоснование и выбор компонентных моделей, соответствующих компонентам АКЭС, для создания композиционной гибридной модели АКЭС;
- разработка компонентных моделей различных типов для представления компонентов АКЭС и оценка точности моделирования компонентов АКЭС на основе выбранных компонентных моделей;
- построение структуры композиционной гибридной модели АКЭС на основе разработанных компонентных моделей, а также структурно-параметрическая настройка взаимосвязей между компонентными моделями в композиционной гибридной модели АКЭС;
- мониторинг и оценка состояния компонентов АКЭС, структурно-параметрическая настройка, а также изменение, при необходимости, типов компонентных моделей.

Рассмотрим эти этапы более подробно.

2.2.2. Сбор, обобщение и анализ информации об АКЭС

Процедура обобщения сведений об АКЭС предусматривает получение и систематизацию данных о: свойствах и характеристиках АКЭС, о ее структуре, об отдельных компонентах СТС и их состояниях, о взаимосвязях и влиянии компонентов АКЭС друг на друга, о степени их инерционности, наконец, о внешних факторах, влияющих на функционирование и состояние АКЭС.

Эти сведения должны дать ответ на вопрос о возможности декомпозиции АКЭС, в том числе, на уровне декомпозиции, до которых она представляется целесообразной, исходя из последующих задач качественного и оперативного управления АКЭС. Для систематизации этих сведений используются: справочные данные, результаты экспериментальных исследований, мнения экспертов.

2.2.3. Выделение компонентов АКЭС, определение значимости показателей

Декомпозиция АКЭС на компоненты выполняется до уровня, на котором дальнейшая детализация не является целесообразной (исходя из задач управления), а системные свойства АКЭС при этом не нарушаются.

Процедура определения значимых показателей компонентов АКЭС включает в себя следующие шаги.

Шаг 1. Определение и группирование показателей компонентов АКЭС, которые могут характеризовать:

- структуру и свойства компонентов АКЭС;
- процессы энергетического баланса генерации и потребления с учетом накопленной энергии и ресурса топлива, значения которых преобразуются и «транслируются» от одного компонента АКЭС к другому;
- внешнюю среду, в которой функционируют компоненты АКЭС.

Шаг 2. Оценка значимости показателей компонентов СТС.

Для оценки значимости показателей, влияющих на функционирование компонентов АКЭС используются результаты сбора и систематизации информации об АКЭС (см. ранее), а также методы, основанные на анализе экспериментальных данных, например, методы регрессионного анализа.

2.2.4. Построение структурной модели АКЭС

Процедура построения структурной модели АКЭС включает в себя следующие шаги.

Шаг 1. Построение укрупненной схемы энергетических потоков в АКЭС.

На основе компонентной схемы АКЭС разрабатывается схема энергетических потоков в АКЭС, предназначенная для демонстрации соответствующего контекстного взаимодействия отдельных компонентов АКЭС при ее функционировании. Использование этой схемы позволяет наглядно на основе оценивания параметров осуществить анализ и сопоставить различные схемы компонентного взаимодействия, и, в последующем, избежать структурных ошибок при разработке композиционной модели АКЭС. На рис. 4 показана укрупненная схема энергетических потоков в АКЭС.

Шаг 2. Построение матрицы смежности для АКЭС.

Матрица смежности АКЭС (см. таблицу 4) иллюстрирует взаимосвязи между компонентами АКЭС. Строки и столбы матрицы смежности соотнесены с обозначениями компонентов АКЭС.

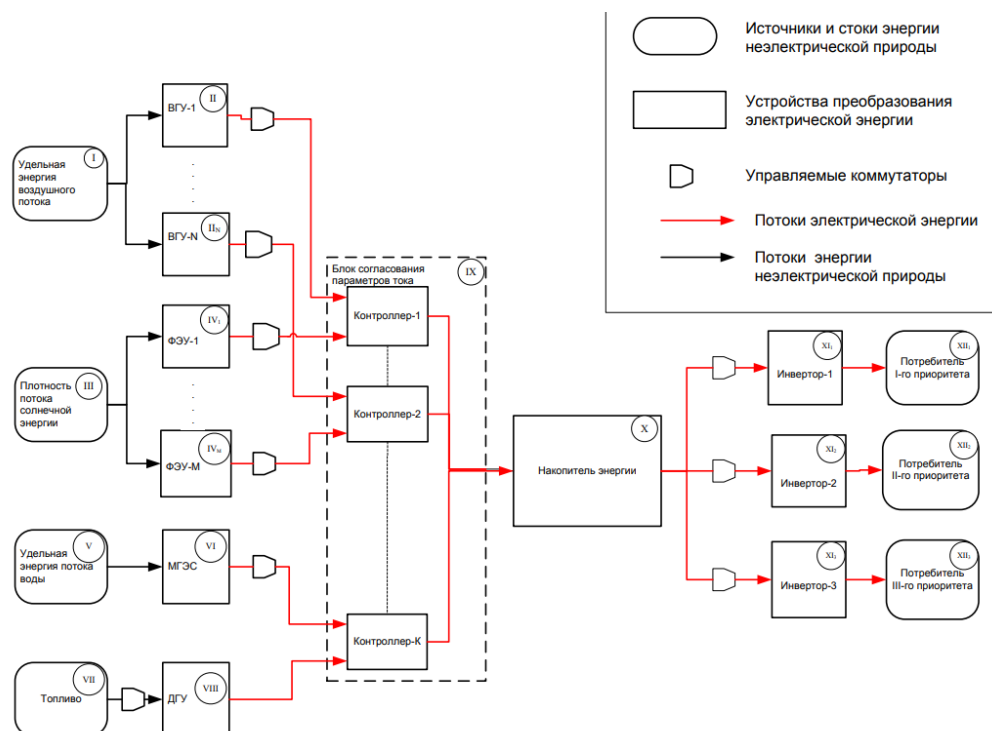


Рис. 4. Укрупненная схема энергетических потоков в АКЭС

Таблица 4 – Матрица смежности АКЭС

Узлы	Узлы																			
	I	II ₁	...	II _N	III	IV ₁	...	IV _M	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI ₁	XI ₂	XI ₃	XII ₁	XII ₂	XII ₃
I	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II ₁	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
...	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
II _N	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
III	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IV ₁	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
...	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
IV _M	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VI	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
VII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
VIII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
IX	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
XI ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
XI ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
XII ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
XII ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
XII ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Построенная схема энергетических потоков в АКЭС, а также сформированная матрица смежности позволяют сформировать структурную модель АКЭС и перейти к обоснованию типов и выбору компонентных моделей АКЭС.

2.2.5. Обоснование и выбор компонентных моделей для построения композиционной гибридной модели АКЭС

Построенная структурная модель АКЭС дает наглядное представление о ее структуре и энергетических потоках, а также является основанием для декомпозиции АКЭС на компоненты.

Процедура обоснования и выбора компонентных моделей для построения композиционной гибридной модели АКЭС состоит из следующих шагов [23].

Шаг 1. Обоснование типов и оценка возможностей компонентных моделей для моделирования компонентов АКЭС.

Результаты анализа АКЭС позволили:

- обосновать совокупность типов компонентных моделей для моделирования компонентов АКЭС: аналитические модели с четкими и нечеткими параметрами, искусственные нейронные сети прямого распространения сигналов, нечетко-логические модели, нейро-нечеткие сети, нечетко-нейросетевые модели [24];
- сформировать признаки (и их номинальные значения) для оценки соответствия компонентов АКЭС компонентным моделям АКЭС:
представление зависимости между входными и выходными показателями компонента АКЭС: {в аналитическом виде; в виде обучающей выборки; в виде экспертных данных; смешанный характер};
представление входных, выходных переменных компонента АКЭС: {четкие входные и выходные переменные; четкие входные и нечеткие выходные переменные; нечеткие входные и четкие выходные переменные; нечеткие входные и выходные переменные};
возможность получения дополнительных сведений для уточнения зависимости между переменными компонента АКЭС: {в виде уточняемых параметров зависимости; в виде обучающей выборки; в виде экспертных данных; как в виде обучающей выборки, так и в виде экспертных данных; получение данных невозможно};
возможность интерпретации зависимости между переменными компонента АКЭС: {интерпретация возможна; интерпретация невозможна; интерпретация не требуется}.

Шаг 2. Определение требований к компонентным моделям для анализа и моделирования компонентов АКЭС.

Каждому из компонентов АКЭС сопоставляется одна или несколько групп требований к компонентным моделям.

Шаг 3. Выбор компонентных моделей для построения композиционной гибридной модели АКЭС.

На основании результатов сопоставления групп требований к компонентным моделям со стороны компонентов АКЭС определяются совокупности компонентных моделей, образующих «дерево покрытия».

После построения «дерева покрытия» АКЭС компонентными моделями выбираются типы моделей, позволяющие рационально построить композиционную гибридную модель АКЭС.

Оценка и выбор совокупности компонентных моделей АКЭС выполняется в соответствии с критерием рационального выбора, например, для минимизации мощности «покрытия» [25].

2.2.6. Разработка компонентных моделей АКЭС

Кратко рассмотрим специфику разработки компонентных моделей различного типа.

Аналитические компонентные модели АКЭС различных компонентных моделей может быть получены как непосредственным заданием их аналитического описания, так и на основе аппроксимации зависимостей. По результатам аналитического описания компонентных моделей требуется оценить их на наличие параметрических ошибок. Для этого, например, нужно решить составленные уравнения для различных начальных условий, соответствующих различным комбинациям возможных состояний компонентов АКЭС и при различных воздействиях внешних факторов. Осуществляется сравнение полученных результатов с допустимыми для компонентов АКЭС значениями. Если значения результирующих показателей не соответствуют интервалам допустимых значений, это означает, что при построении структурной модели АКЭС или в аналитическом описании компонентной модели допущены ошибки.

При построении и использовании аналитических компонентных моделей АКЭС в условиях большого числа разнородных параметров, неопределенности системных и внешних факторов достаточно часто возникает необходимость нечеткого задания (в виде нечетких чисел) параметров этих моделей. В этом случае в качестве компонентных моделей, учитывающих указанные условия, предлагается использовать аналитические компонентные модели с нечеткими параметрами, для расчета которых применяются нечеткие численные методы [26], а проблема накопления неопределенности результатов из-за итерационных вычислений над нечеткими параметрами решается способом, основанным на модальном взаимодействии нечетких параметров [27].

Нейросетевые компонентные модели АКЭС предлагается строить на основе искусственных нейронных сетей прямого распространения сигналов (например, многослойных персептронов), которые предоставляют развитые возможности моделирования компонентов АКЭС за счет аппроксимационных свойств и адаптации к изменяющимся режимам функционирования и внешним факторам [28]. Так, например, использование разработанных и настроенных нейросетевых компонентных моделей в контурах функционирования и управления АКЭС позволяет решить задачи выбора оптимальных рабочих режимов.

Нейро-нечеткие компонентные модели АКЭС представляют собой нейросетевые модели, в структуру и в процедуры обучения/функционирования

которых введена нечеткости на основе положений теории нечетких множеств и нечеткой арифметики [29].

Нечетко-логические компонентные модели СТС в виде согласованных нечетких продукционных правил целесообразно использовать для моделирования компонентов АКЭС, если имеется экспертная информация об их функционировании [30].

Для моделирования компонентов АКЭС целесообразным является использование следующих разновидностей *нейро-нечетких компонентных моделей*: с нечеткими входами, выходами и четкими весами; с нечеткими входами, выходами и весами [31].

Под *нечетко-нейросетевыми компонентными моделями АКЭС* понимаются нечеткие модели, характеризующиеся использованием различных формализмов и процедур построения и обучения искусственных нейронных сетей для снятия ограничений, присущих нечетко-логическим моделям [24]. С учетом сформированных требований, для моделирования компонентов АКЭС целесообразно использовать нечетко-нейросетевые модели с параметрической оптимизацией нечетких правил на основе алгоритмов обучения ИНС с использованием обучающей выборки.

2.2.7. Построение структуры композиционной гибридной модели АКЭС

Разрабатываемая композиционная модель АКЭС является гибридной, так как может состоять из композиции компонентных моделей различного типа.

Для конструирования композиционной гибридной модели АКЭС формируется библиотека соответствующих компонентных моделей. В таблице 5 представлены компонентные модели для разработки композиционной гибридной модели АКЭС.

При объединении компонентных моделей в композиционную гибридную модель АКЭС, отображающую взаимосвязанные процессы энергетического баланса генерации и потребления с учетом накопленной энергии и ресурса топлива, входы IN_i «последующих» компонентных моделей соединяются с выходами OUT_{i-1} «предыдущих» компонентных моделей.

Объединяя компонентные модели в соответствии с их взаимосвязями указанного типа, создается композиционная гибридная модель АКЭС.

На рис. 5 представлена структура разработанной композиционной гибридной модели АКЭС.

Сопоставление результатов моделирования с данными, полученными с приборов и датчиков АКЭС, позволяет судить о достоверности моделирования и выявлять ошибки на этапе построения компонентных моделей и/или при их объединении в композиционную гибридную модель.

Таблица 5 – Компонентные модели для построения
композиционной гибридной модели АКЭС

Компонент АКЭС	Базовая компонентная модель	Замещающая компонентная модель
Источник энергии в виде воздушного потока	Аналитическая модель с четкими параметрами	Нечетко-нейросетевая модель
Источник энергии в виде потока излучения	Аналитическая модель с четкими параметрами	Нечетко-нейросетевая модель
Источник энергии в виде потока воды	Аналитическая модель с четкими параметрами	Аналитическая модель с нечеткими параметрами
Источник энергии в виде топлива для ДГУ	Аналитическая модель с четкими параметрами	Аналитическая модель с нечеткими параметрами
ВГУ	Аналитическая модель с четкими параметрами	Аналитическая модель с нечеткими параметрами
ФЭУ	Аналитическая модель с четкими параметрами	Аналитическая модель с нечеткими параметрами
Мини-ГЭС	Аналитическая модель с четкими параметрами	Аналитическая модель с нечеткими параметрами
ДГУ	Аналитическая модель с четкими параметрами	Аналитическая модель с нечеткими параметрами
Блок согласования тока	Аналитическая модель с нечеткими параметрами	Нейросетевая модель
Накопитель энергии	Аналитическая модель с четкими параметрами	Нейросетевая модель
Инвертор	Аналитическая модель с четкими параметрами	Аналитическая модель с нечеткими параметрами
Сток энергии в виде потребителя энергии	Нечётко-логическая модель	Нечетко-нейросетевая модель

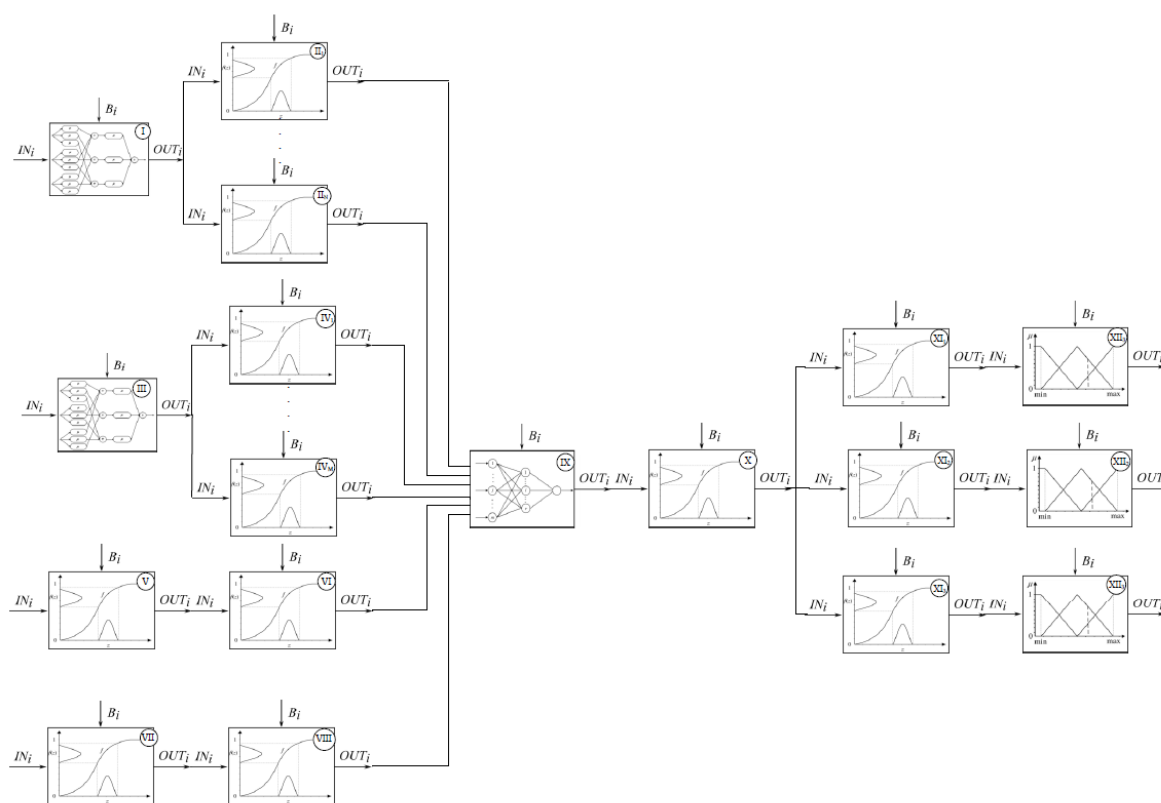


Рис. 5. Структура композиционной гибридной модели АКЭС

Разработанная композиционная гибридная модель АКЭС позволяет:

- уменьшить затраты и сократить экспериментальные исследования при создании и настройке компонентных моделей и композиционной модели в целом;
- осуществлять прогноз состояния компонентов и АКЭС в целом;
- оптимизировать функционирование компонентов и АКЭС в целом;
- проводить моделирование компонентов АКЭС без изменения общей структуры композиционной модели, встраивать новые компонентные модели без остановки моделирования, оперативно дообучать и заменять модель при достижении требуемой точности;
- выполнять поисковые исследования, если структура АКЭС не до конца сформирована или при модернизации устаревшего оборудования, или если характеристики АКЭС зависят от внешних факторов;
- учитывать характеристики и режимы работы для значений параметров, не охваченных экспериментальными испытаниями, а также в режимах, близких к критическим и опасным;
- выполнять расчет характеристик при проектировании нового оборудования АКЭС;
- проектировать компоненты и устройства АКЭС с учетом результатов экспериментов и опыта эксплуатации;
- проводить обучение обслуживающего персонала.

2.2.8. Мониторинг и оценка состояния компонентов АКЭС, структурно-параметрическая настройка, изменение типов компонентных моделей

Параметры компонентов АКЭС, их состояние, процессы энергетического баланса генерации, потребления с учетом накопленной энергии и ресурса топлива постоянно изменяются. Если в ходе мониторинга состояния компонентов АКЭС выявлено несоответствие между выходными данными компонентных моделей (и композиционной гибридной модели в целом) с данными, полученными с приборов и датчиков АКЭС, то эти изменения должны учитываться в композиционной модели АКЭС.

В процессе мониторинга состояния компонентов АКЭС осуществляется:

- оценка точности моделирования компонентов АКЭС соответствующими компонентными моделями, в зависимости от результатов которого выполняется параметрическая, структурно-параметрическая настройка или замена соответствующих моделей, а также переход на компонентные модели других типов, обеспечивающих требуемую точность с учетом накапливаемых данных о функционировании АКЭС, в том числе, во внештатных, аварийных ситуациях и при изменении внешних факторов;
- оценка накапливаемых данных о компонентах АКЭС для изменения типов соответствующих компонентных моделей в зависимости от потребности в обеспечении их предпочтительных свойств (например: снижение объема и сложности вычислений; повышение скорости об-

работки и получения результатов моделирования; обеспечение интерпретируемости результатов и системы в целом).

Возможны различные ситуации мониторинга состояния компонентов АКЭС, механизмы их идентификации, причины и возможные меры по обеспечению заданной точности моделирования.

Ситуация 1. Моделирование компонента АКЭС осуществляется с заданной точностью.

Характеристика ситуации 1: данные, получаемые в ходе функционирования компонента АКЭС, соответствуют (с заданной точностью) результатам моделирования соответствующей компонентной модели. Отсутствует необходимость параметрической настройки компонентной модели.

Механизм идентификации ситуации 1: периодическое сопоставление результатов функционирования компонента АКЭС и его моделирования.

Меры по обеспечению заданной точности моделирования ситуации 1: не требуется принятия каких-либо мер. Если имеются предпочтения по изменению свойств модели для обеспечения требуемой точности моделирования, то выполняется переход к другому типу компонентной модели.

Ситуация 2. Постепенное ухудшение точности моделирования компонента АКЭС.

Характеристика ситуации 2: данные в процессе функционирования компонента АКЭС постепенно меняются и перестают соответствовать заданной точности моделирования.

Механизм идентификации ситуации 2: периодическое сопоставление результатов функционирования и моделирования. Возможность идентификации ситуации на основе прогнозной оценки ухудшения точности моделирования.

Возможные причины ситуации 2: эксплуатационный износ и ухудшение параметров компонента АКЭС; изменение факторов внешней среды.

Меры по обеспечению заданной точности моделирования в ситуации 2:

Шаг 1. Параметрическая настройка компонентной модели на дополнительных данных, получаемых в ходе функционирования.

Шаг 2. Если компонентная модель не позволяет осуществлять параметрическую настройку, то необходимо выполнить: либо выбор компонентной модели, обеспечивающей наибольшую точность; либо выбор компонентной модели, обеспечивающей наибольшую точность и, при необходимости ее параметрическую донастройку с учетом дополнительных данных о функционировании компонента АКЭС.

Ситуация 3. Кратковременное ухудшение точности моделирования компонента АКЭС.

Характеристика ситуации 3: происходит кратковременное ухудшение заданной точности моделирования.

Возможные причины ситуации 3: нештатная ситуация; сбой в работе оборудования.

Меры по обеспечению заданной точности моделирования в ситуации 3 включают в себя следующие шаги.

Шаг 1. Информирование о возникшей ситуации.

Шаг 2. Анализ причин и учет сведений о возникшей ситуации для донстройки компонентных моделей.

Ситуация 4. Резкое ухудшение точности моделирования компонента АКЭС.

Характеристика ситуации 4: происходит резкое ухудшение заданной точности моделирования без последующего ее обеспечения.

Возможные причины ситуации 4: нештатная или аварийная ситуация; сбой или выход из строя оборудования; резкое изменение внешних факторов.

Меры по обеспечению заданной точности моделирования в ситуации 4 включают в себя следующие шаги.

Шаг 1. Информирование о возникшей ситуации и, при необходимости, остановка АКЭС.

Шаг 2. Анализ причин и учет сведений о возникшей ситуации.

Применение созданной композиционной гибридной модели для моделирования взаимосвязанных процессов энергетического баланса генерации и потребления с учетом накопленной энергии и ресурса топлива АКЭС показало, что максимальное отклонение расчетных значений от экспериментальных не превышает 7,4% по всему диапазону характеристик, а на оптимальных режимах не превышает 4,5%.

Заключение

Выполнен анализ АКЭС для формирования требований к анализу, композиционному гибриднему моделированию и управлению этими системами. Охарактеризованы взаимодействующие подсистемы АКЭС: генерации, предназначенной для выработки электрической энергии (ВЭУ, ФЭУ, мини-ГЭС, ДГУ); накопления и хранения энергии; распределения энергии; управления.

Представлена обобщенная структура АКЭС, соответствующая предложенному набору компонентов. Особое внимание уделено анализу подсистем управления АКЭС, предназначенной для: обеспечения функционирования АКЭС в соответствии с планом потребления в заданных погодных условиях при минимальном участии обслуживающего персонала; управления включением и отключением объектов управления АКЭС с учетом их технического состояния, погодных условий, состояния накопителя и плана потребления электрической энергии; формирования плана генерации электрической энергии; формирования плана потребления электрической энергии; оценки технического состояния объектов управления и установки в целом; формирования предупредительных и аварийных сигналов при выходе технических параметров объектов управления АКЭС за пределы нормального функционирования; формирования рекомендаций пользователю по разрешению конфликтных и предаварийных ситуаций; сбора, накопления диагностической информации; отображения формируемых команд управления; сбора, накопления информации о фактической погоде; сбора, накопления основной информации о параметрах функционирования объектов АКЭС; управления системой вентиляции модулей накопителей электрической энергии.

Предложена процедура анализа и композиционного гибридного моделирования АКЭС, включающая в себя: обобщение информации об АКЭС; выделение компонентов АКЭС; создание структурной модели АКЭС; обоснование и выбор компонентных моделей для построения композиционной гибридной модели АКЭС; разработку компонентных моделей различных типов для описания всех компонентов АКЭС и оценку достоверности моделирования компонентов АКЭС с использованием разработанных компонентных моделей; формирование структуры композиционной гибридной модели АКЭС на основе объединения разработанных компонентных моделей и структурно-параметрическую настройку взаимосвязей между компонентными моделями в композиционной гибридной модели АКЭС; мониторинг и оценку состояния компонентов АКЭС, структурно-параметрическую настройку и изменение типов компонентных моделей.

Разработаны механизмы мониторинга состояния компонентов АКЭС, в процессе которого: во-первых, осуществляется оценка точности моделирования компонентов АКЭС соответствующими компонентными моделями, в зависимости от результатов которой выполняется параметрическая, структурно-параметрическая настройка или замена соответствующих разновидностей моделей, а также переход на компонентные модели других типов, обеспечивающих требуемую точность с учетом накапливаемых данных о функционировании АКЭС, в том числе, в нештатных, аварийных ситуациях и при изменении внешних факторов; во-вторых, выполняется оценка накапливаемых данных о компонентах АКЭС для изменения типов компонентных моделей в зависимости от потребности в обеспечении их свойств.

Охарактеризованы ситуации мониторинга состояния компонентов АКЭС, подходы к их идентификации, причины, возможные меры и процедуры по обеспечению заданной точности композиционного гибридного моделирования АКЭС.

Работа выполнена в рамках проекта НИУ «МЭИ» по государственной программе «Приоритет-2030», проект № 4201220 «Интеллектуальный метод и модели анализа и композиционного гибридного моделирования автономных комплексных энергетических систем для удаленных регионов».

Литература

1. Яковлева Э. В. Электротехнический комплекс для электроснабжения геологоразведочных работ с использованием солнечной электростанции: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2013. – 22 с.
2. Коновалова О. Е., Никифорова Г. В. Малая возобновляемая энергетика на северо-западе Арктики // Труды Кольского научного центра РАН. 2016. № 1 (35). С. 117-131.
3. Тупиков Н. Г., Федяинов В. Н. Мобильная система автономного электропитания // Патент России № 106054. 2011. Бюл. № 18.
4. Меньшенин И. О., Толстой М. Ю., Сторожко Е. А. Мобильный автономный источник энергии // Патент России № 122712. 2012. Бюл. № 34.

5. Мирошниченко А. А., Гордиевский Е. М., Кулганатов А. З., Ковалев А. А. Обзор существующих разработок по созданию мобильного энергокомплекса на основе возобновляемых источников энергии // Энергия – XXI век. 2018. № 4 (104). С. 68-72.
6. Рыженко П. И., Поляков Р. Н. Мобильный ветрогенератор-трансформер для Арктики и Крайнего Севера // Деловой журнал NEFTEGAZ.RU. 2021. № 6 (114). С. 54-57.
7. Mobile Power Station [Электронный ресурс]. – URL: <https://upriseenergy.com/> (дата обращения: 20.08.2022).
8. Мобильная автономная солнечная станция [Электронный ресурс]. – URL: <https://tolk.ua/ru/mobilnaya-avtonomnaya-solnechnaya-stantsiya/> (дата обращения: 10.08.2022).
9. Мобильная автономная солнечная электростанция 2,4 кВт [Электронный ресурс]. – URL: <https://asad16.ru/product/mobilnaya-avtonomnaya-solnechnaya-jelektrostantsiya-2-4-kvt/> (дата обращения: 08.08.2022).
10. Солнечная батарея Yingli Solar YLM YL435D-40d PERC [Электронный ресурс]. – URL: <https://gws-energy.ru/solnechnaya-batareya-yingli-solar-ylm-yl435d-40d-perc/> (дата обращения: 10.08.2022).
11. Аминов Д. С. Теоретические основы разработки водопогруженных гидрогенераторов, используемых в качестве возобновляемых источников энергии малых и средних рек: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 2020. – 23 с.
12. Микро ГЭС Акула [Электронный ресурс]. – URL: <https://dealanenergo.ru/nasha-produktsiya/ges/ges-akula> (дата обращения: 08.08.2022).
13. Калимуллин Л. В., Левченко Д. К., Смирнова Ю. Б. Приоритетные направления, ключевые технологии и сценарии развития систем накопления энергии // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2019. №1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prioritetnye-napravleniya-klyuchevye-tehnologii-i-stsenarii-razvitiya-sistem-nakopleniya-energii> (дата обращения: 07.03.2021).
14. MAC Dominator [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.invertor.ru/dominator.html> (дата обращения: 12.08.2022).
15. Долецкая Л. И., Зирюкин В. И., Солопов Р. В. Опыт создания программной модели объекта электроэнергетической системы для исследования работы цифровых средств релейной защиты и автоматики // Прикладная информатика. 2021. Т. 16. № 4 (94). С. 83-95.
16. Аbruков В. С., Кочаков В. Д., Аbruков С. В., Ануфриева Д. А., Васильев А. И., Смирнов А. В. Интеллектуальная система прогнозирования работы солнечных электростанций // Альтернативная энергетика и экология. 2017. № 16-18. С. 30-42.
17. Sinyavsky Yu. V., Kirillova E. A. Intelligent control algorithm for autonomous integrated power plants for arctic regions // Journal of Applied Informatics. 2021. Vol. 16. № 4 (94). P. 74-82.

18. Solopov R. V., Samulchenkov A. S., Ziryukin V. I. Genetic algorithm as a tool for modeling calculations of electric power systems // Journal of Applied Informatics. 2021. Vol. 16. № 6 (96). P. 43-53.
19. Benjamin P., Delen D., Mayer R., Brien T. A Model-Based Approach for Component Simulation Development // Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. Orlando, FL, USA, 2000, pp. 1831-1839.
20. Павловский Ю. Н., Белотелов Н. В., Бродский Ю. И. Имитационное моделирование. – М.: Академия, 2008. – 236 с.
21. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
22. Мисник А. Е., Борисов В. В. Композиционное нейросетевое моделирование сложных технических систем // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2016. № 7. С. 36-46.
23. Борисов В. В., Авраменко Д. Ю. Нечеткое ситуационное управление сложными системами на основе их композиционного гибридного моделирования // Системы управления, связи и безопасности. 2021. №3. С. 207-237.
24. Борисов В. В. Систематизация нечетких и гибридных нечетких моделей // Мягкие измерения и вычисления. 2020. Т. 29. № 4. С. 98-120.
25. Борисов В. В., Зернов М. М. Определение совокупности нечетких моделей для решения комплексной задачи поддержки принятия решений // Вестник Московского энергетического института. 2011. № 1. С. 74-85.
26. Бобков В. И., Борисов В. В., Дли М. И. Подход к исследованию теплопроводности нечёткими численными методами в условиях неопределенности теплофизических характеристик // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 3. С. 73-83.
27. Федулов А. С. Вид взаимодействия нечетких чисел, ограничивающий возрастание неопределенности при выполнении операций нечеткой арифметики // Вестник Московского энергетического института. 2006. № 1. С. 101-109.
28. Круглов В. В., Борисов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия–Телеком, 2002. – 382 с.
29. Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. Нечеткие модели и сети. – М.: Горячая линия–Телеком, 2018. – 284 с.
30. Борисов В. В., Федулов А. С., Зернов М. М. Основы нечеткого логического вывода. Серия «Основы нечеткой математики». Книга 4. – М.: Горячая линия–Телеком, 2014. – 122 с.
31. Борисов В. В., Федулов А. С., Зернов М. М. Основы гибридизации нечетких моделей. Серия «Основы нечеткой математики». Книга 9. – М.: Горячая линия–Телеком, 2017. – 100 с.

References

1. Yakovleva E. V. *Elektrotekhnicheskij kompleks dlya elektrosnabzheniya geologorazvedochnyh работ s ispol'zovaniem solnechnoj elektrostancii*. Diss. kand. tehn. nauk [Electrotechnical complex for power supply of geological exploration

works using a solar power plant. Ph.D. Thesis]. St. Petersburg, 2013. 22 p. (in Russian).

2. Konovalova O. E., Nikiforova G. V. *Malaya vozobnovlyаемая энергетика na severo-zapade Arktiki* [Small renewable energy in the north-west of the Arctic]. Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2016, no. 1(35), pp. 117-131 (in Russian).

3. Tupikov N. G., Fedyainov V. N. *Mobil'naya sistema avtonomnogo elektropitaniya* [Mobile autonomous power supply system]. Patent Russia, no. 106054. 2011.

4. Menshenin I. O., Tolstoy M. Y., Storozhko E. A. *Mobil'nyj avtonomnyj istochnik energii* [Mobile autonomous energy source]. Patent Russia, no. 122712. 2012.

5. Miroshnichenko A. A., Gordievsky E. M., Kulganatov A. Z., Kovalev A. A. *Obzor sushchestvuyushchih razrabotok po sozdaniyu mobil'nogo energokompleksa na osnove vozobnovlyаемых источников энергии* [Review of existing developments to create a mobile energy complex based on renewable energy sources]. Energy – XXI century, 2018, no. 4 (104), pp. 68-72 (in Russian).

6. Ryzhenko P. I., Polyakov R. N. *Mobil'nyj vetrogenerator-transformer dlya Arktiki i Krajnego Severa* [Mobile wind generator transformer for the Arctic and the Far North]. *Business Magazine NEFTEGAZ.RU*, 2021, no. 6 (114), pp. 54-57 (in Russian).

7. Mobile Power Station [Electronic resource]. Available at: <https://upriseenergy.com> (accessed 20 August 2022).

8. *Mobil'naya avtonomnaya solnechnaya stanciya* [Mobile autonomous solar station] [Electronic resource]. Available at: <https://tolk.ua/ru/mobilnaya-avtonomnaya-solnechnaya-stantsiya/> (accessed 10 August 2022).

9. *Mobil'naya avtonomnaya solnechnaya elektrostanciya 2.4 kWt* [Mobile autonomous solar power plant 2.4 kWt]. Available at: <https://asad16.ru/product/mobilnaja-avtonomnaja-solnechnaja-jelektrostancija-2-4-kvt/> (accessed 08 August 2022).

10. *Solnechnaya batareya Yingli Solar YLM YL435D-40d PERC* [Yingli Solar YLM YL435D-40d PERC Solar Battery]. Available at: <https://gws-energy.ru/solnechnaya-batareya-yingli-solar-ylm-yl435d-40d-perc/> (accessed 10 August 2022).

11. Aminov D. S. *Teoreticheskie osnovy razrabotki vodopogruzhennyh gidrogeneratorov, ispol'zuemyh v kachestve vozobnovlyаемых источников энергии malyh i srednih rek*. Diss. kand. tehn. nauk [Theoretical foundations of the development of water-immersed hydrogenerators used as renewable energy sources of small and medium-sized rivers. Ph.D. Thesis]. Chelyabinsk, 2020. 23 p. (in Russian).

12. *Mikro GES Akula* [Micro hydroelectric power station Akula] [Electronic resource]. Available at: <https://dealanenergo.ru/nasha-produktsiya/ges/ges-akula> (accessed 08 August 2022).

13. Kalimullin L. V., Levchenko D. K., Smirnova Yu. B. *Prioritetnye napravleniya, klyuchevye tekhnologii i scenariy razvitiya sistem nakopleniya energii*

[Priority directions, key technologies and scenarios for the development of energy storage systems]. *Vestnik of Ivanovo State Engineering University*, 2019, no. 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/prioritetnye-napravleniya-klyuchevye-tehnologii-i-stsenarii-razvitiya-sistem-nakopleniya-energii> (accessed 07 Marth 2021) (in Russian).

14. MAC Dominator. Available at: <http://www.invertor.ru/dominator.html> (accessed 12.08.2022).

15. Doletskaya L. I., Ziryukin V. I., Solopov R. V. *Opyt sozdaniya programmnoj modeli ob"ekta elektroenergeticheskoy sistemy dlya issledovaniya raboty cifrovyyh sredstv relejnoj zashchity i avtomatiki* [An electric power system object model creating experience for researching the operation of digital means of relay protection and automation]. *Journal of Applied Informatics*, 2021, vol. 16, no. 4 (94), pp. 83-95 (in Russian).

16. Abrukov V. S., Kochakov V. D., Abrukov S. V., Anufrieva D. A., Vasiliev A. I., Smirnov A. V. *Intellectual'naya sistema prognozirovaniya raboty solnechnyyh elektrostancij* [Intelligent system of forecasting the operation of solar power plants]. *Alternative Energy and Ecology*, 2017, no. 16-18. pp. 30-42.

17. Sinyavsky Yu. V., Kirillova E. A. Intelligent control algorithm for autonomous integrated power plants for arctic regions. *Journal of Applied Informatics*, 2021, vol. 16, no. 4 (94), pp. 74-82.

18. Solopov R. V., Samulchenkov A. S., Ziryukin V. I. Genetic algorithm as a tool for modeling calculations of electric power systems. *Journal of Applied Informatics*, 2021, vol. 16, no. 6 (96), pp. 43-53.

19. Benjamin P., Delen D., Mayer R., Brien T. A Model-Based Approach for Component Simulation Development. *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*. Orlando, FL, USA, 2000, pp. 1831-1839.

20. Pavlovsky Yu. N., Belotelov N. V., Brodsky Yu. I. *Imitacionnoe modelirovanie* [Simulation modeling]. Moscow, Academy, 2008. 236 p. (in Russian).

21. Buslenko N. P. *Modelirovanie slozhnyh sistem* [Modeling of complex systems]. Moscow, Nauka, 1978. 400 p. (in Russian).

22. Misnik A. E., Borisov V. V. *Kompozicionnoe nejrosetevoe modelirovanie slozhnyh tekhnicheskikh system* [Composite neural network modeling of complex technical systems]. *Journal Neurocomputers*, 2016, no. 7, pp. 36-46 (in Russian).

23. Borisov V. V., Avramenko D. Yu. *Nechetkoe situacionnoe upravlenie slozhnymi sistemami na osnove ih kompozicionnogo gibridnogo modelirovaniya* [Fuzzy situational control of complex systems based on composite hybrid modeling]. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 3, pp. 207-237 (in Russian).

24. Borisov V. V. *Sistematizaciya nechetkih i gibridnyh nechetkih modelej* [Systematization of fuzzy and hybrid fuzzy models]. *Soft Measurement and Computing*, 2020, vol. 29, no. 4, pp. 98-120 (in Russian).

25. Borisov V. V., Zernov M. M. *Opreделение sovokupnosti nechetkih modelej dlya resheniya kompleksnoj zadachi podderzhki prinyatiya reshenij* [Definition of a set of fuzzy models for solving a complex problem of decision support]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, 2011, no. 1, pp. 74-85 (in Russian).

26. Bobkov V. I., Borisov V. V., Dli M. I. *Podhod k issledovaniyu teploprovodnosti nechyotkimi chislennymi metodami v usloviyah neopredelennosti teplofizicheskikh harakteristik* [Approach to a Heat Conductivity Research by Fuzzy Numerical Methods in the Conditions of Indeterminacy Thermal Characteristics]. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 3, pp. 73-83 (in Russian).
27. Fedulov A. S. *Vid vzaimodeistviia nechetskikh chisel, ogranichivaiushchii vozrastanie neopredelennosti pri vypolnenii operatsii nechetkoi arifmetiki* [Type of cooperation of unclear numbers, limiting growth of vagueness at implementation of operations of unclear arithmetic]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, 2006, no. 1, pp. 101-109 (in Russian).
28. Kruglov V. V., Borisov V. V. *Iskusstvennye neyronnye seti. Teoriya i praktika* [Artificial neural networks. Theory and practice]. Moscow, *Goryachaya Liniya–Telekom*, 2002. 382 p. (in Russian).
29. Borisov V. V., Kruglov V. V., Fedulov A. S. *Nechetkie modeli i seti* [Fuzzy models and networks]. 2nd ed., stereotype. Moscow, *Goryachaya Liniya–Telekom*, 2018. 284 p. (in Russian).
30. Borisov V. V., Fedulov A. S., Zernov M. M. *Osnovy nechetskogo logicheskogo vyvoda. Seriya "Osnovy nechyotkoj matematiki". Kniga 4* [Fundamentals of the of fuzzy logic inference. Series "Fundamentals of Fuzzy Mathematics". Book 4]. Moscow, *Goryachaya liniya–Telekom*, 2014. 122 p. (in Russian).
31. Borisov V. V., Fedulov A. S., Zernov M. M. *Osnovy gibrizatsii nechyotkih modelej. Seriya "Osnovy nechyotkoj matematiki". Kniga 9* [Fundamentals of hybridization of fuzzy models. Series "Fundamentals of Fuzzy Mathematics". Book 9]. Moscow, *Goryachaya Liniya–Telekom*, 2017. 100 p. (in Russian).

Статья поступила 19 сентября 2022 г.

Информация об авторах

Борисов Вадим Владимирович – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры вычислительной техники. Национальный исследовательский университет «МЭИ» (филиал в г. Смоленске). Старший научный сотрудник научно-исследовательского центра. Военная академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных сил Российской Федерации им. А.М. Василевского. Области научных интересов: нечеткий и нейро-нечеткий анализ, моделирование сложных систем и процессов; интеллектуальная поддержка принятия решений; ассоциативные системы хранения и обработки информации. E-mail: vbor67@mail.ru

Дли Максим Иосифович – доктор технических наук, профессор. Заместитель директора по научной работе. Национальный исследовательский университет «МЭИ» (филиал в г. Смоленске). Области научных интересов: интеллектуальный анализ данных; интеллектуальная поддержка принятия решений. E-mail: midli@mail.ru

Синявский Юрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры «Технологические машины и оборудование». Национальный

исследовательский университет «МЭИ» (филиал в г. Смоленске). Области научных интересов: интеллектуальный анализ данных; моделирование сложных систем и процессов. E-mail: sinyavskiyv@yandex.ru

Федулов Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор. Директор. Национальный исследовательский университет «МЭИ» (филиал в г. Смоленске). Области научных интересов: нечеткий когнитивный анализ и моделирование сложных систем и процессов; интеллектуальная поддержка принятия решений. E-mail: fedulov_a@mail.ru

Адрес: 214013, Россия, г. Смоленск, Энергетический проезд, д. 1.

Composite hybrid modeling of autonomous integrated energy systems

V. V. Borisov, M. I. Dli, Yu. V. Sinyavsky, A. S. Fedulov

Problem definition. These systems consist of renewable energy sources, such as wind farms, photovoltaic installations, mini-hydroelectric power plants. One of the main problems hindering the introduction of such energy systems is the significant variability of systemic and external factors, which leads to instability of electric energy generation. Therefore, the Autonomous Integrated Energy Systems (AIES) are being created, containing, in addition to renewable energy sources, diesel generator sets and energy storage systems. For the effective operation of the AIES, it is necessary to ensure a balance between energy production, its consumption and the level of energy in storage. However, there are difficulties due to the peculiarities of such systems and external factors. Therefore, it is advisable to combine various approaches and methods for constructing composite models of AIES in order to improve the management efficiency of such systems. At the same time, it is necessary to provide for the designing of composite hybrid AIES models that take into account the specifics of the development, training and interaction of different types of component models. **The aim of the work** is to develop and study a composite hybrid model of the AIES, as well as the procedures for its construction and monitoring. **Methods used:** system analysis, methods of designing, training and using neural models, fuzzy logic models, neuro-fuzzy models, fuzzy neural models, mathematical statistics. **Novelty:** the novelty is characterized by the composite hybrid model of the AIES, which consists of component models of various types (analytical models with clear and fuzzy parameters, neural models, fuzzy logic models, neuro-fuzzy models, fuzzy neural models). An original procedure for designing this model and a technique for monitoring the state of AIES in the process of modeling and functioning are also proposed. **Result:** The composite hybrid model of the AIES and the procedure for its construction are used for intelligent modeling and control of the AIES. **Practical significance:** The practical significance of the results is to increase the accuracy of AIES modeling to improve the management efficiency of such systems.

Keywords: autonomous integrated energy systems, composite hybrid modeling, intelligent models.

Information about Authors

Vadim Vladimirovich Borisov – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor. Professor of the Department of Computer Engineering. The Branch of National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk. Senior researcher. Military Academy of Army Air Defence A.M. Vasilevsky. Fields of research: fuzzy and fuzzy neural models and networks, intellectual decision-making support, associative memory, associative systems of storage and processing of the information and knowledge. E-mail: vbor67@mail.ru

Maxim Iosifovich Dli – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor. Head of the Department of Science. The Branch of National Research University “Moscow

Power Engineering Institute” in Smolensk. Fields of research: data mining; intelligent decision support. E-mail: midli@mail.ru

Sinyavsky Yuri Vladimirovich – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor of the Department of “Technological Machines and Equipment”. The Branch of National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk. Fields of research: data mining; modeling of complex systems and processes. E-mail: sinyavskiyyv@yandex.ru

Fedulov Alexander Sergeevich – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor. Director. The Branch of National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk. Fields of research: fuzzy cognitive analysis and modeling of complex systems and processes; intelligent decision support. E-mail: fedulov_a@mail.ru

Address: Russia, 214013, Smolensk, Energeticheskiy proezd, 1.