Модельные исследования работы микросети с системой управления[1]

• **Чаплин А.Г., ООО «ЦЭИР», Москва**

Одной из тенденций развития современной мировой энергетики является децентрализация производства электроэнергии с использованием микросетей. Микросеть (также используется термин микрогрид (от англ. microgrid)) — это энергосистема, снабжающая потребителей электроэнергией непосредственно на месте их расположения. Как правило, в её состав входят источники энергии (в т.ч. возобновляемые), устройства для накопления энергии, локальные потребители. Микросеть может работать как автономно, так и в составе более крупной энергосистемы.

В статье представлен опыт специалистов компании «ИОНИК Инжиниринг» исследования микросети с системой управления производством, распределением и потреблением электроэнергии — «автономной многофакторной системы управления потоками энергии» (AmEFC).

Основные компоненты микросети и принципы управления

В состав микросети входят:

- возобновляемые источники энергии (ВИЭ);
- системы накопления энергии;
- распределительная сеть с преобразователями электрического тока;
- потребители энергии;
- аварийные источники энергии.

Структурная схема микросети с системой управления представлена на рис. 1.

В микросети используются ВИЭ двух типов: панели солнечных батарей и ветряные турбины вертикального типа. Предусматривается использование солнечных панелей с перовскитовыми элементами, имеющих повышенный коэффициент полезного действия (КПД). Модульная конструкция панелей позволяет менять масштаб солнечной электростанции в зависимости от условий применения.

Конструкция ветряных турбин с вертикальной осью (VAWT) обеспечивает пониженный уровень шума, а размещение на уровне земли упрощает и удешевляет техническое обслуживание. Кроме того, такие турбины способны работать в условиях сильного порывистого ветра, обеспечивая выработку энергии, когда обычные турбины могут давать сбои. Построение VAWT также предполагается модульным, что обеспечивает возможности расширения в будущем.

Производство энергии ВИЭ непостоянно, поэтому в микросети необходимы накопители энергии. Для этого предусматривается использование аккумуляторных батарей и локальных гидроаккумулирующих электростанций (мини-ГАЭС). Мини-ГАЭС включает в себя насос, расположенный на некоторой высоте резервуар для воды и гидротурбину с генератором. В периоды, когда ВИЭ вырабатывают избыточную энергию, насос перекачивает воду в резервуар. В периоды, когда потребителям не хватает энергии, вода сливается из резервуара и вращает гидротурбину с генератором.

Солнечные панели, ветряные турбины и аккумуляторы вырабатывают постоянный ток, а для энергоснабжения потребителей нужен переменный. Для преобразования рода тока используются специальные преобразователи — инверторы. ВИЭ, аккумуляторы и инверторы объединены шиной постоянного тока. В свою очередь, все инверторы и потребители объединены сетью переменного тока.

В рассматриваемой микросети потребители электроэнергии разделены на две категории: обычные и ответственные. Для электроснабжения ответственных потребителей предъявляются особые требования к надежности. К таким потребителям относятся оборудование и инфраструктура, требующие круглосуточного бесперебойного электроснабжения, например, системы жизнеобеспечения в медицинских учреждениях, аварийное освещение, системы связи. Обычные потребители вносят основной вклад в суточное потребление электроэнергии. Это ежедневно работающие электроприборы и системы: освещение, вентиляция и кондиционирование, бытовая техника и т.д. Для таких потребителей обеспе-

[1] Статья подготовлена по материалам статьи «Autonomous Multi-Factor Energy Flows Controller (AmEFC): Enhancing Renewable Energy Management with Intelligent Control Systems Integration» Dimitrios Vezeris, Maria Polyzoi, Georgios Kotakis, Pagona Kleitsiotou, Eleni Tsotsopoulou. // Energy and Power Engineering, 2023, 15, 399–442.

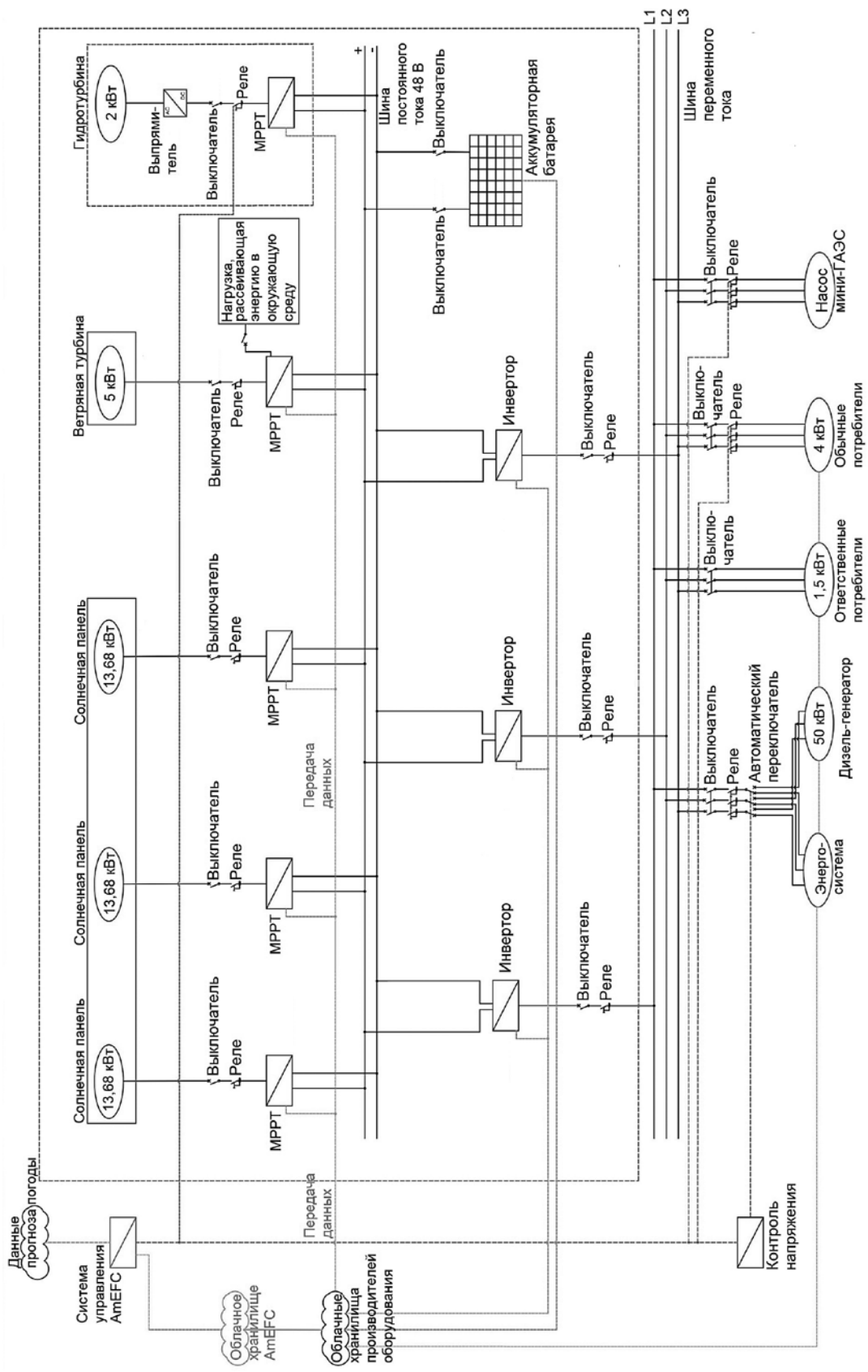


Рис. 1. Структурная схема микросети с системой управления

чение круглосуточного электроснабжения также важно, но в случаях, когда производство энергии не успевает за ростом потребления, приоритетным становится энергоснабжение ответственных потребителей.

Каждый из ВИЭ оснащен т.н. системой отслеживания режима максимальной производительности (MPPT). Такие системы должны обеспечивать оптимальный (с точки зрения выработки энергии и КПД) режим работы ВИЭ в каждый момент времени.

Аккумуляторные батареи оснащаются локальной системой управления (BMS), которая контролирует основные параметры: напряжение, силу тока и температуру, управляет процессами заряда и разряда, не допуская избыточного заряда и чрезмерного разряда батарей, за счёт чего обеспечивается КПД батареи и продлевается её срок службы.

Если выработка энергии в микросети превышает потребление, то избыток энергии используется для заряда аккумуляторных батарей. Если аккумуляторные батареи полностью заряжены, а выработка избыточной энергии сохраняется, то предлагается использовать избыточную энергию для наполнения резервуара мини-ГАЭС.

Если микросеть работает в составе более крупной энергосистемы, то микросеть может как потреблять, так и отдавать энергию во внешнюю сеть. При низкой выработке энергии ВИЭ или при резком увеличении нагрузки потребителей микросеть забирает энергию из внешней сети. За счёт этого не нарушается внутренний энергетический баланс микросети, не нарушается работа потребителей. В свою очередь, если в микросети имеется избыток энергии, то она может передаваться во внешнюю сеть. Такой механизм не только оптимизирует распределение энергии на местном уровне, но и делает более надежной работу большой энергосистемы, повышая устойчивость, адаптивность и экологичность всего энергетического комплекса.

В некоторых случаях внешняя энергосистема не может выступать в качестве надежного источника энергии, например, при масштабных отключениях энергии или в удалённых районах. В таких случаях в качестве вспомогательного источника энергии используется дизель-электрический генератор, который может быть оперативно включен при дефиците энергии, обеспечивая надежное и бесперебойное энергоснабжение потребителей.

Программное и аппаратное обеспечение системы

Центральным узлом системы управления микросетью (автономной многофакторной системы управления AmEFC) является программное обеспечение различных уровней и компонентов этой системы.

Такие элементы микросети как MPPT, инверторы, BMS передают в режиме реального времени данные о работе оборудования в облачные хранилища производителей оборудования. Этот постоянный поток информации в каждый момент времени даёт представление о состоянии, показателях работы и возможностях оптимизации работы микросети. Также этот массив данных хранится в централизованной облачной базе системы управления. В ней систематизируется и хранится вся информация, начиная от уровней воды в резервуарах, архива данных о нагрузках ответственных и обычных потребителей, архива данных избытков мощности до подробных данных о прогнозе погоды.

Информация из базы данных используется в AmEFC для управления процессами и принятия решений. За счёт использования методов оптимизации определяется оптимальное распределение энергетических потоков (OPF) в сети, тем самым обеспечивается эффективная работа оборудования с выдачей требуемой мощности потребителям.

Поимо решений на базе традиционных алгоритмов, в AmEFC применяются методы обучения с подкреплением (RL-методы). За счёт использования накопленных данных, выявления закономерностей, адаптации к новым ситуациям RL-методы могут принимать прогнозирующие и упреждающие решения. Например, основываясь на данных прогноза погоды и архивных данных о потреблении энергии, система может оптимизировать запас энергии в батареях в преддверии пасмурного дня для обеспечения бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей.

За счёт сочетания различных методов AmEFC не только реагирует на отклонения, но и формирует упреждающие воздействия. Система постоянно принимает решения в режиме реального времени для оптимального управления потоками энергии с учетом возможностей перенаправления избыточной энергии на ГАЭС, потребления энергии из внешней сети во время пиков нагрузки или оптимизации циклов зарядки аккумулятора на основе прогнозов погоды.

Результирующим воздействием AmEFC на объект управления являются формирующиеся с помощью промежуточных реле команды

управления коммутационной аппаратурой, выполняющей отключения и подключения элементов микросети: источников и накопителей энергии, потребителей.

Моделирование работы микросети

Для представленной выше микросети в среде MATLAB Simulink была разработана математическая модель. В модели учтены:

- ВИЭ (солнечные батареи, ветряные турбины);
- ГАЭС;
- аккумуляторные батареи с BMS;
- потребители электроэнергии;
- шина постоянного тока и преобразователи постоянного тока в переменный;
- управление работой источников, накопителей и потребителей электроэнергии;
- информационное взаимодействие и энергообмен с основной электрической сетью.

В модели солнечной батареи были учтены: энергетическая экспозиция конкретных условий работы (энергия солнечного излучения на единицу площади за определённый промежуток времени), температурные условия и др.

В модели ветряной турбины с вертикальной осью реализован процесс преобразования энергии ветра в электрическую энергию, задаются скорость ветра и характеристики турбины. В модели реализовано преобразование с помощью универсальной мостовой схемы переменного тока синхронного генератора с постоянными магнитами (PMSG) в постоянный ток со стабилизированным напряжением 48 В.

В модели ГАЭС отражены работа насоса, перекачивающего воду на высоту, и выработка электроэнергии за счёт гравитационного движения воды.

В модели аккумуляторной батареи учтены емкость аккумулятора, уровень заряда, скорость разряда/подзарядки и контроль технического состояния оборудования с помощью BMS.

В модели потребителей учтена возможность их отключения / подключения.

Входные параметры модели:

- характеристика солнечного излучения;
- температура окружающей среды;
- скорость ветра;
- начальный уровень заряда аккумуляторной батареи;
- параметры ответственных и обычных потребителей.

Выходные параметры модели:

- производство/потребление энергии за период времени с разбивкой по компонентам модели;
- уровень заряда аккумуляторной батареи;
- уровень воды в резервуаре ГАЭС (запас энергии в кВт·ч);
- состояние ответственных и обычных потребителей (подключены/отключены);
- параметры взаимодействия сетей (энергия, передаваемая или потребляемая внешней энергосистемой).

Центральное место в модели занимает система управления AmEFC. Её задача — обеспечение бесперебойного энергоснабжения ответственных потребителей. AmEFC оценивает данные, поступающие в режиме реального времени из взаимосвязанных компонентов модели. Совмещение полученных данных с работой сложных алгоритмов позволяет принимать мгновенные решения по распределению энергии. Эти решения касаются хранения и использования электроэнергии, выбора режима работы ВИЭ, необходимости отключения потребителей и взаимодействия с электрическими сетями.

Цель моделирования — проверить надежность работы системы при энергоснабжении потребителей и возможность эффективного использования избыточной энергии с помощью ГАЭС.

Начальные условия моделирования: AmEFC в работе, ВИЭ вырабатывают энергию. Если выработка энергии превышает нагрузку потребителей и энергию, необходимую для оптимального заряда аккумулятора, то это фиксируется как избыток энергии. При выявлении избытка AmEFC включает насос, перекачивающий воду в резервуар ГАЭС. Когда энергии ВИЭ становится недостаточно, и аккумулятор начинает разряжаться для энергоснабжения потребителей, BMS в режиме реального времени предоставляет данные о степени заряда аккумулятора. Как только степень разряда аккумулятора достигает определённого значения, AmEFC запускает турбину ГАЭС для выработки электроэнергии.

Критерии оценки работы AmEFC:

- обеспечение непрерывной работы потребителей за весь период моделирования;
- эффективность преобразования избыточной электроэнергии в потенциальную и обратно;
- маневренность и гибкость системы при определении потребности в источниках и накопителях энергии, переключениях между различными источниками энергии и накопителями.

Сценарии моделирования

Адаптивность и эффективность работы системы с солнечными батареями и ветряными турбинами наиболее наглядно можно проверить

при её работе в различных погодных условиях. Для этого в сценариях моделирования учитывались два ключевых фактора: интенсивность солнечного излучения и скорость ветра. Для проведения исследований для каждого фактора были выделены три уровня, которые представлены в таблице.

Уровни солнечного излучения и скорости ветра, рассмотренные при моделировании

Уровни	Солнечное излучение	Скорость ветра
A	солнечный день	день с сильным ветром
B	умеренно солнечный день	день с умеренным ветром
C	малосолнечный день	день со слабым ветром

Моделирование проводилось на недельном интервале времени, при этом упор был сделан на охват множества вариантов условий окружающей среды путем сочетания представленных выше уровней солнечного излучения и скорости ветра. Для моделирования была составлена последовательность различных вариантов погоды в течение недели:

- 1-й день: солнечно (A) в сочетании с сильным ветром (A);
- 2-й день: солнечно (A) в сочетании с умеренным ветром (B);
- 3-й день: умеренно солнечно (B) в сочетании с сильным ветром (A);
- 4-й день: умеренно солнечно (B) в сочетании с умеренным ветром (B);
- 5-й день: малосолнечно (C) в сочетании с сильным ветром (B);
- 6-й день: малосолнечно (C) в сочетании с умеренным ветром (B);
- 7-й день: умеренно солнечно (B) в сочетании со слабым ветром (C).

Для проверки эффективности и адаптивности системы управления AmEFC в различных условиях работы модельные исследования были проведены в нескольких сценариях.

1-й сценарий: изолированная работа микросети без использования данных прогноза погоды и без ГАЭС. Это начальный, базовый сценарий, в котором микросеть работает изолированно от энергосистемы, не получая каких-либо внешних данных, в том числе данных прогноза погоды. Основная задача системы управления AmEFC в этом сценарии — управлять производством энергии ВИЭ и накапливать избыточную энергию с помощью аккумуляторных батарей. В этом сценарии проводится проверка возможности управления производством и распределе-

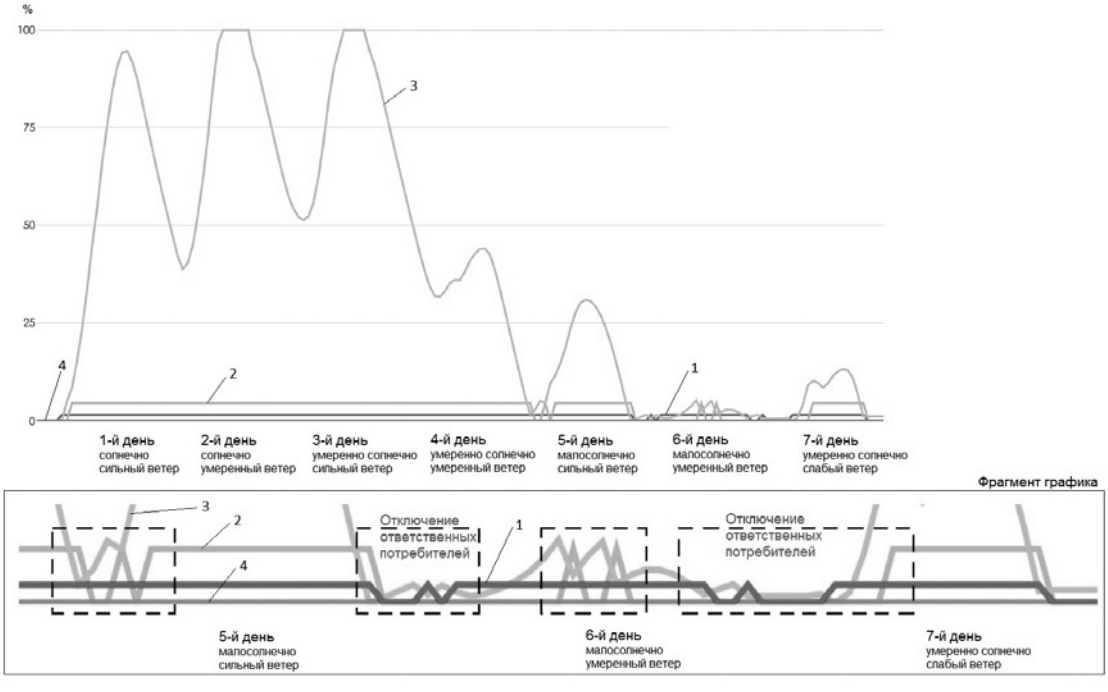


Рис. 2. Графики расхода и потребления энергии (1-й сценарий моделирования)
1 — ответственные потребители, 1,5 кВт; *2* — обычные потребители, 4 кВт; *3* — аккумуляторная батарея, 100 кВт·ч; *4* — резервуар ГАЭС, 4 кВт·ч

нием энергии в автономном режиме работы. Без использования данных прогноза погоды, а также без накопления энергии с помощью ГАЭС не обеспечивается бесперебойное энергоснабжение ответственных потребителей, происходят частые отключения (см. рис. 2).

2-й сценарий: изолированная работа микросети без использования данных прогноза погоды. Этот сценарий аналогичен 1-му с одним отличием: AmEFC может использовать избыточную энергию для наполнения резервуара ГАЭС. В таком сценарии без использования данных прогноза погоды, даже с возможностью накопления энергии с помощью ГАЭС, также не обеспечивается бесперебойное энергоснабжение ответственных потребителей (см. рис. 3).

3-й сценарий: изолированная работа микросети с использованием данных прогноза погоды. По сравнению с предыдущим сценарием, этот сценарий дополнен использованием данных прогноза погоды в режиме реального времени. Благодаря этому дополнению AmEFC не только управляет производством и хранением энергии, но и заблаговременно корректирует стратегию распределения энергии. Прогнозируя потенциальный дефицит или переизбыток энергии на основе данных прогноза погоды, система управления может обеспечить бесперебойное электроснабжение ответственных потребителей. При этом система может принимать решения о временном отключении обычных потребителей для экономии энергии в прогнозируемые периоды низкой выработки энергии (см. рис. 4).

4-й сценарий: работа микросети в составе энергосистемы. Последний и наиболее сложный сценарий моделирования предусматривает возможность подключения микросети к более крупной сети. В этом случае система управления AmEFC в динамическом режиме управляет избытком энергии, принимая решения о том, накапливать ли энергию с помощью ГАЭС или продавать ее обратно в сеть. Основная цель — обеспечение бесперебойного энергоснабжения всех потребителей с получением двойной выгоды за счёт накопления энергии и потенциального получения дохода за счет продажи энергии. В этом сценарии демонстрируются возможности AmEFC при работе в более комплексном энергетическом ландшафте, где микросети могут тесно взаимодействовать с инфраструктурой более крупных энергосистем.

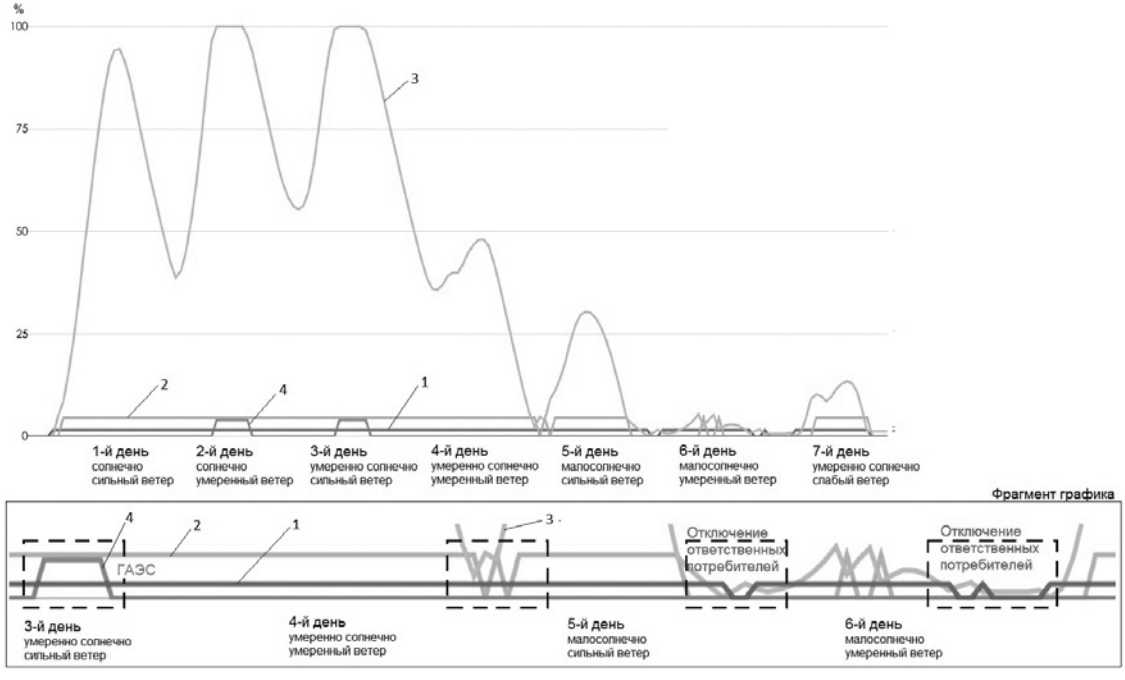


Рис. 3. Графики расхода и потребления энергии (2-й сценарий моделирования)

1 — ответственные потребители, 1,5 кВт; *2* — обычные потребители, 4 кВт; *3* — аккумуляторная батарея, 100 кВт·ч; *4* — резервуар ГАЭС, 4 кВт·ч

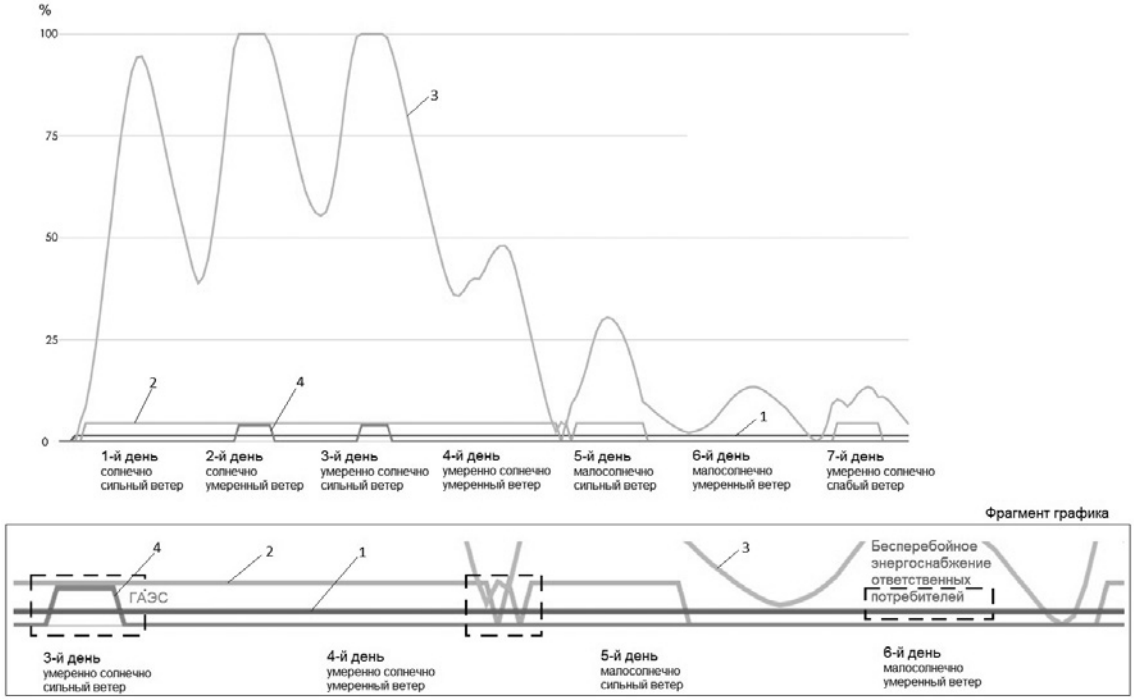


Рис. 4. **Графики расхода и потребления энергии (3-й сценарий моделирования)**

1 — ответственные потребители, 1,5 кВт; *2* — обычные потребители, 4 кВт; *3* — аккумуляторная батарея, 100 кВт·ч; *4* — резервуар ГАЭС, 4 кВт·ч

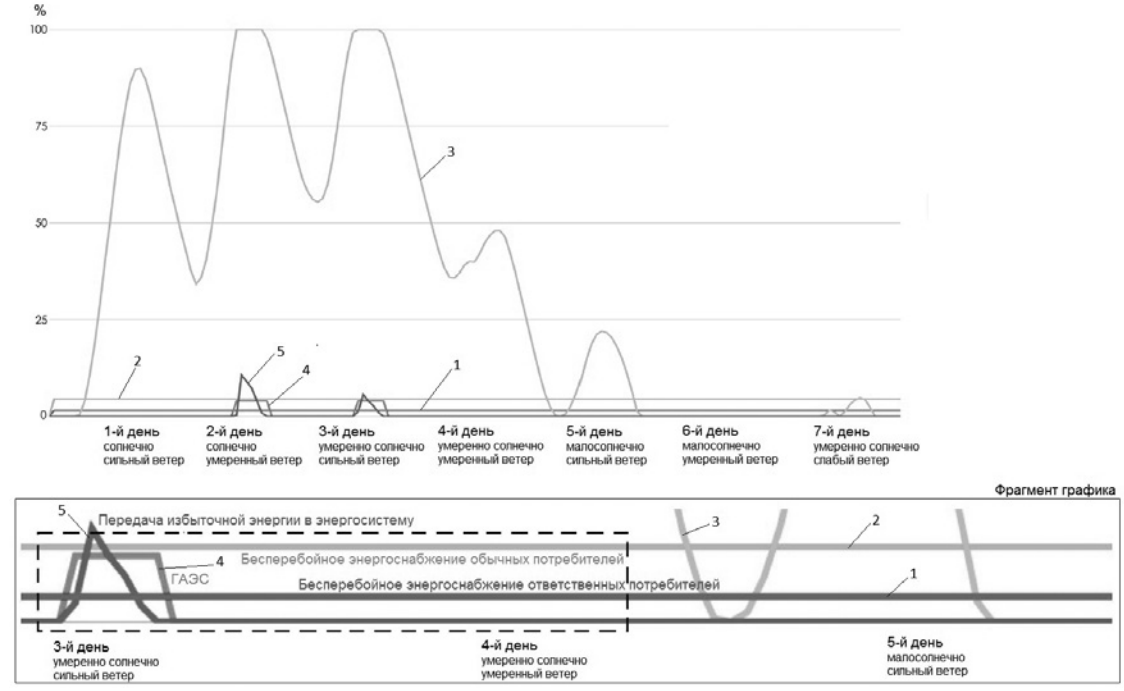


Рис. 5. **Графики расхода и потребления энергии (4-й сценарий моделирования)**

1 — ответственные потребители, 1,5 кВт; *2* — обычные потребители, 4 кВт; *3* — аккумуляторная батарея, 100 кВт·ч; *4* — резервуар ГАЭС, 4 кВт·ч; *5* — избыток в энергосистему, кВт·ч

При работе в энергосистеме обеспечивается бесперебойное энергоснабжение ответственных и обычных потребителей с одинаковыми приоритетами, при этом избыточная энергия поначалу накапливается в резервуаре ГАЭС, а дополнительные излишки продаются энергокомпании PPC (Public Power Corporation, Греция). Графики представлены на рис. 5.

Выводы

В своей статье специалисты компании «ИОНИК Инжиниринг» представили структуру и описание микросети с системой управления производством, распределением и потреблением электроэнергии. Привели результаты создания математической модели и результатов исследования её работы в различных сценариях.

Для дальнейшего продолжения работ в этой области авторы считают необходимым решение следующих задач:

- расширение взаимодействия между микросетями (включая разработку надежных протоколов взаимодействия) для эффективного управления обменом энергоресурсами между микросетями и повышения устойчивости энергосистемы в целом;
- использование технологий искусственного интеллекта и машинного обучения для расширения возможностей системы управления в части прогнозирования, что позволит сделать управление более точным и адаптируемым к изменяющимся условиям;
- проведение модельных исследований работы системы в более широком диапазоне условий, включая экстремальные погодные явления и отказы оборудования;
- рассмотрение экономических вопросов внедрения AmEFC;
- опытно-промышленную эксплуатацию рассмотренной системы управления в различных географических и климатических условиях.