

Исследование оптимальных режимов интеллектуальных сетей с двухсторонним поток^{*}ом энергии

В.З. МАНУСОВ^a, Н. ХАСАНЗОДА^b, Ш.А. БОБОЕВ^c

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

^a manusov36@mail.ru ^b nasrullo-5445@mail.ru ^c shboboev@mail.ru

Доказана необходимость оптимизации режимов интеллектуальной системы в концепции Smart Grid с функцией двустороннего потока энергии от своих источников распределенной генерации. В связи с этим для активных потребителей введено понятие генерирующего потребителя, что обеспечивает возможность гибко регулировать потоки энергии и выравнять график нагрузки, а также свести к минимуму финансовые затраты на потребляемую энергию. Введено и обосновано новое понятие – холонический подход – в концепции Smart Grid, а также новый термин «генерирующий потребитель-холон» (ГП-холон), который подразумевает способность электропотребителя самостоятельно генерировать энергию с помощью возобновляемых источников, аккумулировать ее, обмениваться энергией с другими подобными ГП-холонами и основной генерирующей системой. Для построения интеллектуальной сети использована холоническая структура, основанная на совокупности холонов (подсистем). Холоническая структура предполагает подсистемы различной природы, расположенные на разных уровнях агрегирования, состоящие между собой во взаимосвязи, чтобы сформировать иерархию саморегулируемых холонов, которая называется холархией. В соответствии с представлениями Кестлера (A. Koestler) холоны одновременно являются как целым, так и частью. Они в основном автономны, что позволяет им самостоятельно обеспечивать свое существование. Двусторонний поток энергии для холонической структуры предполагает возможность генерации и накопление энергии за счет внутренней структуры электропотребителя. Ключевым моментом в работе является использование собственных ветроресурсов, которые достаточно велики в прибрежной зоне Дальнего Востока и на островах. Разработана новая математическая модель оптимального электропотребления генерирующим потребителем в виде системы нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ) с двусторонним потоком энергии. Разработана система приоритетности выбора источников генерации, обеспечивающая минимизацию материально-финансовых затрат электропотребителя.

Ключевые слова: интеллектуальная сеть, концепция Smart Grid, двусторонний поток энергии, генерирующей потребитель-холон, холархия, возобновляемых источников энергии, ветроэнергетическая станция, аккумулятирование энергии, оптимизационная модель

^{*} Статья получена 06 марта 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергетическая система (ЭЭС) России является уникальным организационно-техническим объектом. Однако централизованная система организации и управления ЭЭС нуждается в модернизации и использовании инновационных технологий. В последнее десятилетие в передовых странах мира развивается технология Smart Grid. Этот термин до сих пор не имеет четкого терминологического эквивалента в русском языке. К наиболее распространенным эквивалентным русскоязычным терминам относятся «интеллектуальная сеть энергетики», «интеллектуальная электроэнергетическая система», «активно-адаптивная сеть». В настоящее время имеется множество определений Smart Grid, при этом каждая из сторон-участниц процесса (энергокомпания, энергопотребитель, автоматизации энергообъектов, системные интеграторы и другие) видят в Smart Grid свои функции и задачи [1, 2].

Впервые термин Smart Grid использован авторами S.M. Amin и B.F. Wollenberg в их публикации «Toward a Smart Grid» [3]. Применение этого термина за рубежом было связано с чисто рекламными названиями специальных контроллеров, предназначенных для управления режимом работы и синхронизации автономных ветрогенераторов, отличающихся нестабильным напряжением и частотой, с электрической сетью. Затем термин стал применяться для обозначения микропроцессорных счетчиков электроэнергии, способных самостоятельно накапливать, обрабатывать, оценивать информацию и передавать ее по специальным каналам связи и даже через Интернет [4].

Важной особенностью Smart Grid является возможность реализации двусторонних потоков энергии и коммуникативной информации за счет того, что генерирующий потребитель может получать энергию от ЭЭС также от возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и накопителя энергии после ее аккумуляирования. В этом коренное отличие Smart Grid от традиционных электрических сетей, в которых электроэнергия и поток информации обычно однонаправленный [5, 6]. Электроэнергия генерируется на базе центральной электростанции, а затем проходит через систему передачи и распределительные сети для генерирующих потребителей.

В настоящей работе основное внимание уделено построению системы Smart Grid, обеспечивающей двусторонний поток электрической энергии и коммуникативную информацию между энергообъектами и потребителями за счет применения новейших технологий и инструментов, которые позволяют повысить эффективность работы электросетевого комплекса.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ НА ОСНОВЕ ХОЛОНИЧЕСКОГО ПОДХОДА

На основе наблюдений Кестлер [7] придумал слово *holon*, объединив греческое слово *holos*, что означает «целое», и греческий суффикс *on* – «часть». Холон относится к отдельной логической сущности, которая является как целой, так и частью. Холоны в основном автономны, что позволяет им самостоятельно регулировать свое существование. Более того, они взаимодействуют друг с другом и образуют большие холоны на более высоком уровне агрегирования (агрегация). Холоны могут быть повторно организова-

ны на разных уровнях агрегирования, чтобы сформировать иерархию саморегулируемых холонов, которая в этом случае называется holarchy (холархия). Диаграмма, представляющая холархию, показана на рис. 1.

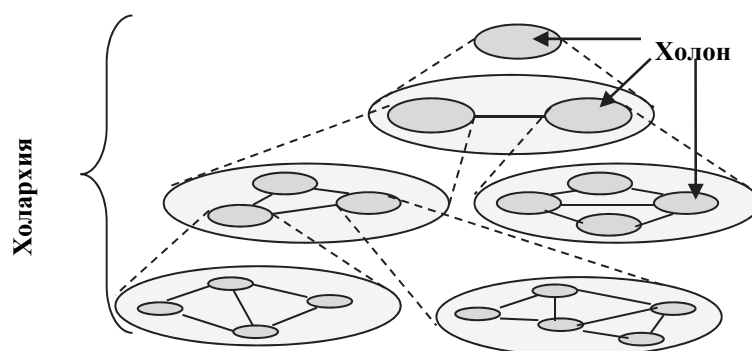


Рис. 1. Холархия как организация холонов

Fig. 1. Holarchy as an organization of holons

Функционируя автономно, холон может взаимодействовать с другими холонами в холархии для достижения общих целей. В динамической среде холоны также могут изменять свои свойства. Эти свойства холонической концепции делают ее весьма привлекательной для организации очень сложных систем, в том числе Smart Grid. Автономия холонов способствует распределенному управлению системой, в которой агрегирование отдельных холонов повышает эффективность и качество функционирования системы. Кроме того, с учетом динамической реконфигурации холархия становится более устойчивой к изменениям и адаптируется к своей и внешней среде [8, 9].

Холоническая концепция обладает преимуществом и значительными отличительными особенностями по сравнению с иерархическими и агентскими технологиями. В отличие от холархии, в иерархии степень автономности элемента сильно ограничена из-за отношения ведущего / ведомого, которое существует между слоями объектов [10, 11].

В настоящей работе предлагается новая модель Smart Grid на основе холонической структуры (рис. 2), содержащая три холона высокого уровня, а именно:

- 1) холон – интеллектуальная энергосистема;
- 2) холон – информационные технологии;
- 3) холон – система коммуникации.

Функции холонов высокого уровня заключаются следующем:

– интеллектуальная система обеспечивает надежную и экономичную системы электроснабжения, которая состоит из генерации электроэнергии, передачи электроэнергии на расстояние, распределения мощности и аккумуляции электроэнергии;

– информационные технологии поддерживают технический и коммерческий учеты электроэнергии, интеллектуальный мониторинг счетчиков и соответствующее управление и хранение информации;

– система коммуникация основывается на передовой коммуникационной инфраструктуре и технологиях.

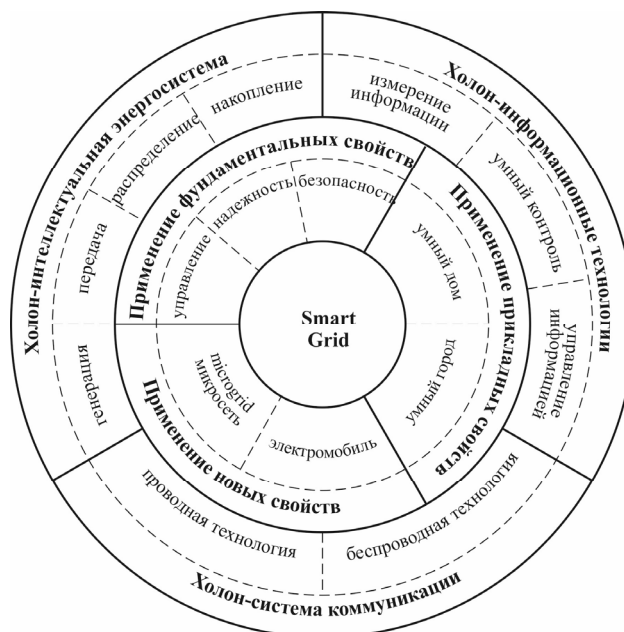


Рис. 2. Инфраструктура интеллектуальной сети и ее приложения

Fig. 2. The Smart Grid infrastructure and its applications

Например, первый холон содержит холоны более низкого уровня: генерации, передачи, распределения и накопления. Холоны научной природы разделяются на применение фундаментальных свойств, прикладных свойств и новых свойств. Они также содержат свои холоны более низкого уровня.

Функции холонов другой природы заключаются в следующем:

- фундаментальные применения сосредоточены на технологиях управления энергией, надежности системы, безопасности и конфиденциальности, включая управление электропотреблением, повышением энергоэффективности, максимизацию пользовательской полезности и защиту системы;
- прикладные применения могут быть реализованы в качестве двух примеров – это умный дом и умный город, которые подключаются к Smart Grid, оказывая влияние на социальное положение его человеческого сообщества;
- новые применения представляют два новых технических решения в Smart Grid: электрический автомобиль и Microgrid с использованием управления энергией для поддержки электромобилей и распределенной генерации возобновляемых источников энергии в Microgrids.

2. ВЕТРОВЫЕ РЕСУРСЫ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

Метеорологические данные о скорости ветра на Тихоокеанском побережье России доказывают целесообразность строительства двух ветроэлектростанций (ветропарков) на островах Русский и Попова.

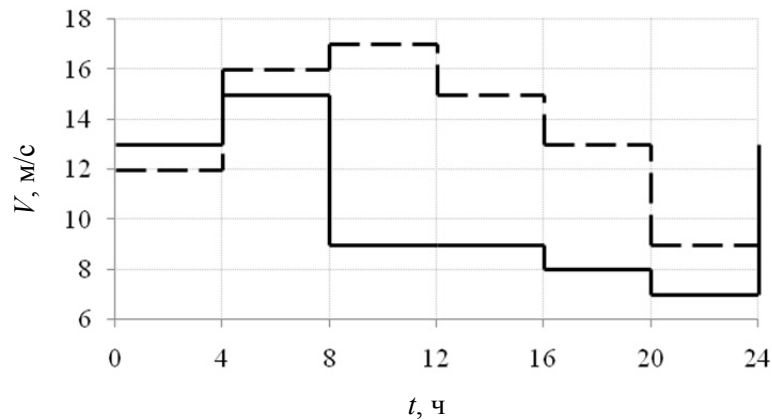


Рис. 3. Скорость ветра на островах Русский (сплошная линия) и Попова (пунктирная линия)

Fig. 3. The wind speed on the Russky (solid line) and Popov (dotted line) islands

Если будут осуществлены планы ОАО «РусГидро» по развитию концепции интеллектуальной сети, то будет предусмотрено строительство Дальневосточной ветроэлектростанции (ВЭС) на островах Русский (до 16 МВт) и Попова (до 20 МВт) [12].

Известно, что мощность на выходе ВЭУ напрямую зависит от скорости ветрового потока, который сильно изменяется во времени, от местной погоды и поверхности местности. Зависимость между скоростью ветра, проходящего через ометаемую площадь установки A (м^2), и мощностью выражается через формулу

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p(\lambda), \quad (1)$$

где ρ – плотность воздушного потока (кг/м^3), зависящая от температуры и давления воздуха; A – площадь, ометаемая лопастями; V – скорость ветра; C_p – коэффициент эффективности ВЭУ; λ – коэффициент быстроходности.

Ометаемая поверхность может быть вычислена по формуле

$$A = \pi R^2, \quad (2)$$

где R – радиус ветроколеса, м.

Из выражения (1) можно заметить, что зависимость между скоростью ветра и мощностью ВЭУ нелинейная и является кубической. В масштабах целого ветрового парка эта взаимосвязь выражается еще сильнее, так как ветропарк представляет собой комплекс ВЭУ и каждая установка использует разные скорости и направления ветра.

Один из простых методов преобразования скорости ветра в мощность – это использование характеристики мощности от производителя конкретной установки. Подобный метод и результаты исследования подробно описаны в работах [13–15]. Необходимо отметить, что данные скорости ветра, получаемые с анемометра на самой установке либо полученные с метеорологической

мачты, установленной на основе ветроэнергетического кадастра, не совсем соответствуют той скорости, которая непосредственно падает в ометаемую площадь установки.

Таким образом, преобразование реальных данных скорости ветра, измеренных в течение года на метеорологической мачте, в скорость ветра, которая соответствует уровню высоты оси ступицы ротора, можно осуществить с помощью методов экстраполяции, например степенного закона

$$V_c(t) = V_m(t) \left(\frac{H}{H_m} \right)^m, \quad (3)$$

где V_c – скорость ветра на уровне оси ступицы ротора (м/с); V_m – скорость ветра на уровне метеомачты (м/с); H – высота оси ступицы ротора ВЭУ (для данного типа установки она равна 100 м); H_m – высота метеомачты (10 м); m – коэффициент сезонности, изменяется по временам года: зима – 0.17, весна – 0.12, лето – 0.17, среднегодовой – 0.26.

Необходимо отметить, что в зависимости от условий и ситуации для подобного преобразования скорости ветра из одного уровня в другой может подойти тот или иной метод экстраполяции. При возможности измерить скорость ветра на уровне оси ступицы ротора ВЭУ необходимость в преобразовании отпадает.

После определения скорости ветра следует выполнить ее преобразование в электрическую мощность ВЭУ с помощью характеристики мощности ветроустановки типа WTU 2.0, показанной на рис. 4.

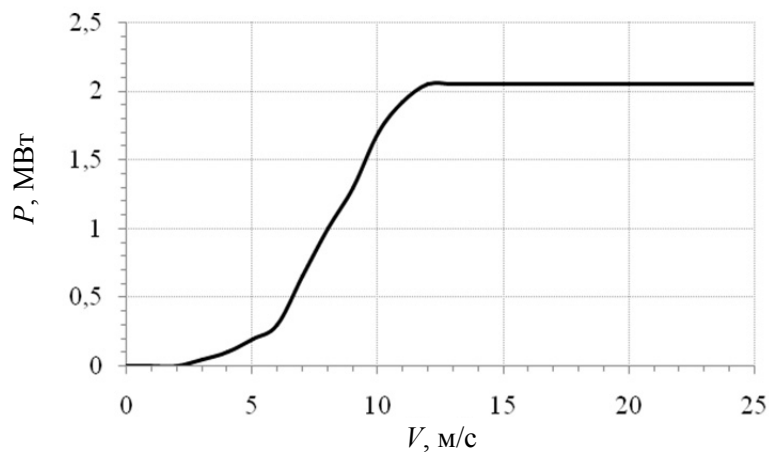


Рис. 4. Характеристика мощности ВЭУ WTU 2,05 МВт

Fig. 4. The power characteristic of WPI WTU of 2.05 MW

Как видно, выработка мощности начинается с отметки скорости ветра в 3 м/с и является стартовой позицией в процессе выработки. В диапазоне скоростей от 3 м/с до 12 м/с идет выработка номинальной мощности. Начиная с 12 м/с до 25 м/с мощность поддерживается на номинальном уровне. Выше последней отметки срабатывает команда отключения установки в целях безопасности. Значения преобразованной мощности ВЭС показано на рис. 5.

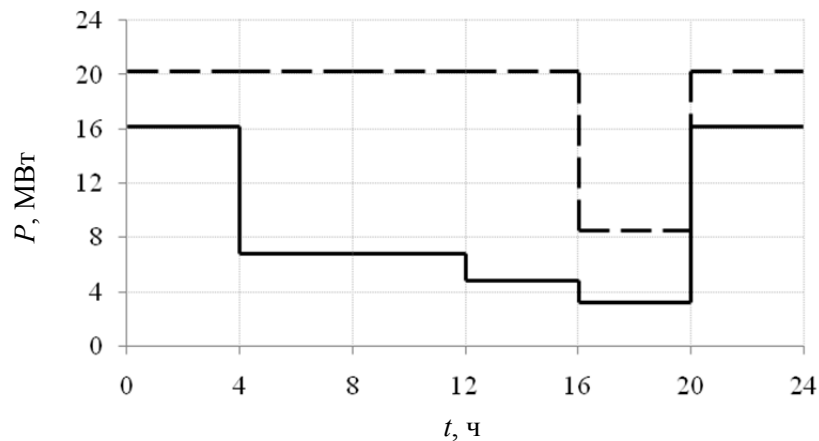


Рис. 5. Суточные графики выдачи мощности ВЭС (сплошная линия – о. Русский и пунктирная линия – о. Попова)

Fig. 5. Daily patterns of the WTU power supply (the solid line shows power supply on the Russky island and the dotted line shows power supply on the Popov island)

Мощность, которую выдает ВЭС острова Попова, стабилизирована на предельной мощности отдельных ВЭУ WTU 2,05 МВт, так как скорость ветра превышает 12 м/с и доходит до 20 м/с. В связи с тем, что электропотребление на острове Попова меньше вырабатываемого, избыточная электроэнергия участвует в обмене в качестве двустороннего потока энергии.

3. АЛГОРИТМ ДОСТИЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ГЕНЕРИРУЮЩЕГО ПОТРЕБИТЕЛЯ

Уравнение баланса для данной системы будет иметь следующий вид

$$P_{ЭС} + P_{ВЭУ} \pm P_{ак} = P_{п} + \Delta P, \quad (4)$$

где $P_{ЭС}$ – мощность, которую можно закупить в ЭЭС; $P_{ВЭУ}$ – мощность ВЭУ; $P_{ак}$ – мощность аккумуляторной батареи; $P_{п}$ – мощность потребителя; ΔP – потери, кВт.

В интегральной форме

$$\int_0^{24} P_{ЭС}(t) dt + \int_0^{24} P_{ВЭУ}(t) dt \pm \int_0^{24} P_{ак}(t) dt = \int_0^{24} P_{п}(t) dt + \int_0^{24} \Delta P(t) dt. \quad (5)$$

В концепции двустороннего потока энергии открывается возможность получения электроэнергии от трех источников: энергосистемы, ВЭУ и накопителя. Стоимости этих видов энергии различны, и, кроме того, они определяется по двум зонам тарифов стоимости энергии энергосистемы. Для этой цели было реализовано программное обеспечение на основе разработанного алгоритма. Данный программный продукт представляет собой систему поддержки принятия решений для минимизации финансовых расходов на по-

требляемую электроэнергию. Эффективность принимаемых решений определяется оптимальным соотношением ее получения от трех указанных видов источников энергии при различных ценах для каждого часа суточного графика нагрузки. Задача является оптимизационной с непредсказуемой в некоторой степени выработкой мощности ВЭУ и заданными ограничениями на возможность аккумулирования энергии накопителем. Результаты расчета приведены ниже.

Примем следующие исходные данные:

- $P_{\text{ТП}}$ – потребляемая мощность острова Русский или острова Попова;
- $P_{\text{ЭС}}$ – передаваемая мощность энергосистемы;
- $P_{\text{max}}^{\text{ВЭУ}}$ – максимально возможная мощность вырабатываемой ВЭУ острова Русский или острова Попова, где $0 \leq P_{\text{max}}^{\text{ВЭУ}} \leq P_{\text{ном}}^{\text{ВЭУ}}$;

где $0 \leq P_{\text{max}}^{\text{ВЭУ}} \leq P_{\text{ном}}^{\text{ВЭУ}}$;

- $P_{\text{max}}^{\text{ак}}$ – максимально передаваемая мощность накопителей острова

Русский или острова Попова, где $0 \leq P_{\text{max}}^{\text{ак}} \leq P_{\text{ном}}^{\text{ак}}$.

Для оптимизации расходов за электроэнергию в течение суток выполняется подбор значений из входного вектора вырабатываемой или передаваемой электроэнергии и умножается на матрицу цен. Основная система уравнений для генерирующего потребителя при двустороннем потоке энергии приведена ниже:

$$\begin{cases} c_{11} \cdot P_{\text{ЭС}} + c_{12} \cdot P_{\text{ВЭУ}} + c_{13} \cdot P_{\text{ак}} = m_1, \\ c_{21} \cdot P_{\text{ЭС}} + c_{22} \cdot P_{\text{ВЭУ}} + c_{23} \cdot P_{\text{ак}} = m_2, \\ c_{31} \cdot P_{\text{ЭС}} + c_{32} \cdot P_{\text{ВЭУ}} + c_{33} \cdot P_{\text{ак}} = m_3, \end{cases} \quad (6)$$

где $m_i, i = \overline{1,3}$ – суммарные результаты умножения каждой строки,

$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix}$ – матрица цен.

Решение системы линейных алгебраических уравнений на каждом шаге итерации решается методом исключения Гаусса. Прямой ход состоит в обнулении поддиагональных элементов, а обратный ход состоит в решении уравнений с верхней треугольной матрицей, причем первым находится последнее по номеру неизвестное.

Матрица цен представляет собой диагональную матрицу вида

$$\begin{pmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где c_{11} – цена электроэнергии за 1 кВт/ч из энергосистемы; c_{22} – цена электроэнергии за 1 кВт/ч из ВЭС; c_{33} – цена электроэнергии за 1 кВт/ч из накопителя энергии.

Задача минимизации расходов решается по заданной модели

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 C_{ij} P_j = M \rightarrow \min, \quad (8)$$

где C – матрица цен; P – вектор расходов электроэнергии, состоящий из $(P_{ЭС}, P_{ВЭУ}, P_{ак})^T$ элементов; M – суммарный результат $M = \sum_{i=1}^3 m_i$.

Во время подбора значений вырабатываемой или передаваемой электроэнергии из входного вектора обязательно должны выполняться следующие ограничения:

$$0 \leq P_{ЭС} \leq P_{ч, \max}^{ГП}; \quad 0 \leq P_{ВЭУ} \leq P_{ч, \max}^{ВЭУ}; \quad 0 \leq P_{ак} \leq P_{ч, \max}^{ак}.$$

Разработан алгоритм решения поставленной задачи, и на его основе осуществлена программная реализация на языке Delphi. Скриншот программы представлен на рис. 6.

Рис. 6. Внешний вид разработанной программы

Fig. 6. The design of the developed program

В качестве контрольного расчета выбран суточный график электропотребления одного из дней осеннего периода с учетом возможной генерации ВЭС и аккумулярования энергии. Из приведенных графиков на рис. 7, а видно, что при двухзонном тарифе стоимости электроэнергии от энергосистемы, когда дневной тариф действует с 7 часов до 23 часов, а ночной сниженный

тариф – с 23 часов до 7 часов, оптимальное электропотребление складывается следующим образом:

- аккумулярование энергии необходимо осуществлять при льготном тарифе и во время избытка энергии от ВЭС;
- в период льготного тарифа при нехватке энергии у ГП получать и/или аккумуляровать энергию от энергосистемы;
- в период дневного тарифа при нехватке энергии у ГП получать от накопителя и энергосистемы;
- во всех периодах ночного и дневного тарифов предпочтение отдается генерации от ВЭС.

С помощью решения оптимизационной задачи минимизируются финансовые затраты от всех источников генерации за каждый час суточного графика и в целом на суточном времени. График минимальных финансовых затрат за сутки представлен на рис. 7, б.

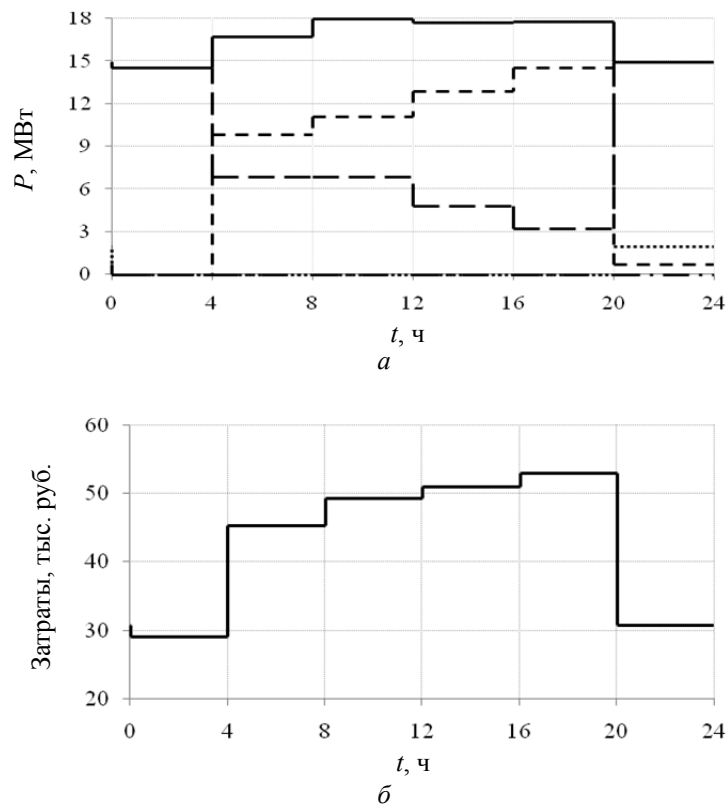


Рис. 7. Одновременное использование электроэнергии всех видов:

а – распределение мощности в ГП₁ (————— $P_{\text{нагр}}$, $P_{\text{накоп}}$, - - - - - $P_{\text{ЭС}}$,
- - - - - $P_{\text{ВЭУ}}$ и - . - . - $P_{\text{ак}}$); б – минимальная расход ГП₁

Fig. 7. Simultaneous energy consumption of all types:

а) power distribution in PG1 (————— P_{load} , P_{accum} , - - - - - P_{PG} ,
- - - - - P_{WG} and - . - . - P_{ab}); б) minimal power consumption from LRS₁

Для условий, когда подключен ГП₂ (остров Попов) со своей ВЭС мощностью до 20 МВт, возникает возможность не только минимизации расходов за электроэнергию, но и продажи электроэнергии в энергосистему или осуществления взаимовыгодного обмена энергией между генерирующими потребителями (ГП-холонами).

В табл. 1 представлены условия энергетического баланса на суточном интервале с дискретностью четыре часа для генерирующего потребителя – острова Русский. Видно, что заряд аккумулятора целесообразно проводить в начале суток. Использование энергии ветра необходимо осуществлять в утренний и вечерний максимумы (8 и 20 часов), чтобы не покупать энергию из энергосистемы. Наряду с этим активный потребитель (ГП₁) сам может поставлять избыточную энергию в энергосистему.

Таблица 1

Table 1

Электропотребление мощности острова Русский (ГП₁), МВт

Power consumption of Russky island (LRS₁), MW

Время суток, часы	0	4	8	12	16	20	24
$P_{\text{наг}}$	14,93	14,54	16,73	17,98	17,73	17,79	14,93
$P_{\text{ак1}}$	2	0	0	0	0	0	2
$P_{\text{ЭС}}$	0	0	0	0	0	9,91	0
$P_{\text{ВЭУ1}}$	16,25	14,54	6,86	6,86	4,82	3,23	16,25
$P_{\text{ак1}}$	0	0	0	0	0	0	0
ГП ₁ → ГП ₂	0	0	0	0	0	0	0
ГП ₁ → ЭС	0	1,71	0	0	0	0	0
ГП ₂ → ГП ₁	0,68	0	9,87	11,12	12,91	4,65	0,68

В табл. 2 выполнены аналогичные расчеты для острова Попова (ГП₂). Показано, что в связи с незначительной собственной нагрузкой и мощным ветропарком почти всегда имеется избыток энергии за счет ветра, который может быть направлен для потребителя ГП₁ и в энергосистему.

Таблица 2

Table 2

Электропотребление мощности острова Попова (ГП₂), МВт

Power consumption of Popov island (LRS₂), MW

Время суток, часы	0	4	8	12	16	20	24
$P_{\text{наг}}$	3,56	3,27	3,74	3,82	3,69	3,92	3,56
$P_{\text{ак2}}$	2	0	0	0	0	0	2
$P_{\text{ЭС}}$	0	0	0	0	0	0	0
$P_{\text{ВЭУ2}}$	5,56	3,27	3,74	3,82	3,69	3,92	5,56

Окончание табл. 2

End tab. 2

Время суток, часы	0	4	8	12	16	20	24
$P_{ак2}$	0	0	0	0	0	0	0
$ГП_2 \rightarrow ГП_1$	0,68	0	9,87	11,12	12,91	4,65	0,68
$ГП_2 \rightarrow ЭС$	14,07	17,04	6,7	5,37	3,71	0	14,07
$ГП_1 \rightarrow ГП_2$	0	0	0	0	0	0	0

В табл. 3 приведены оптимальные финансовые затраты при покрытии графика нагрузки из всех возможных источников питания, включая возобновляемые источники энергии. Показано, что, несмотря на минимизацию расходов, генерирующий потребитель ($ГП_1$) не получает дополнительных доходов, так как его собственное электропотребление не может быть покрыто даже при двусторонних потоках энергии.

Таблица 3

Table 3

Оптимизация финансовых затрат на электропотребление (тыс. руб.)

Optimization of financial expenses for power consumption (ths rbl)

Время суток, часы	0	4	8	12	16	20	24
Минимальный расход $ГП_1$	32,5	29,08	13,72	13,72	9,64	38,172	32,5
Минимальный расход $ГП_2$	11,12	6,54	7,48	7,64	7,38	7,84	11,12
Максимальный доход $ГП_1$	0	1,539	0	0	0	0	0
Максимальный доход $ГП_2$	13,615	15,336	47,7	47,859	48,747	13,95	13,615
Итого $ГП_1$	-32,5	-27,541	-13,72	-13,72	-9,64	-38,172	-32,5
Итого $ГП_2$	+2,495	+8,796	+40,22	+40,219	+41,367	+6,11	+2,495

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представлена новая научная концепция организации структуры интеллектуальной сети в технологии Smart Grid, отличающаяся возможностью двустороннего потока энергии для электропотребителя. На этой основе сформулирована идея интеллектуальной системы электроснабжения с реализацией двусторонних потоков энергии и функцией ее аккумулирования в накопителях. Возможность осуществления двусторонних потоков энергии обусловлена тем, что у электропотребителя есть выбор ее получения от трех видов источников: с одной стороны, от энергосистемы, а с другой – от ВИЭ и накопителя.

2. Введено и обосновано новое понятие – холонический подход – в концепции и технологии Smart Grid. Оно предполагает построение общей интеллектуальной системы как совокупности холонов (подсистем) различной природы и состоящих между собой во взаимосвязи. В свою очередь, холоны могут создавать новые объединения путем агрегирования на более высоком уровне. Таким образом, возникает некоторая многоуровневая система иерархической природы. Такая вновь образованная из холонов система названа холархией.

3. Предложена математическая модель для двустороннего потока энергии генерирующего потребителя с учетом ценообразования и тарифов, отличающаяся тем, что она устанавливает гибкие финансовые отношения с интеллектуальной сетью в концепции Smart Grid.

4. Доказана возможность минимизации финансовых затрат при различных соотношениях потребляемой электроэнергии от ЭЭС, ВЭС и накопителя. Алгоритм предусматривает возможность накопления энергии в моменты ночного минимума или избыточной мощности ВЭС. Программный продукт позволяет существенно улучшить концепцию и технологию построения интеллектуальной сети в системе Smart Grid.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tuballa M.L., Abundo M.L. A review of the development of Smart Grid technologies // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 3. – P. 710–725.
2. Negeri E., Baken N. Smart integration of electric vehicles in an energy community // Proceedings of the 1st International Conference on Smart Grids and Green IT Systems. – Porto, Portugal, 2012. – P. 25–32.
3. Amin S.M., Wollenberg B.F. Toward a Smart Grid // IEEE P&E Magazine. – 2005. – Vol. 3, N 5. – P. 34–41.
4. Brown R.E. Impact of Smart Grid on distribution system design // Proceedings of IEEE "Power and Energy Society General Meeting". – Pittsburgh, 2008. – P. 1–4.
5. European Smart Grids technology platform: vision and strategy for Europe's electricity networks of the future / European Commission Directorate-General for Research Sustainable Energy Systems. – European Union, 2006. – URL: http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf (accessed: 17.09.2018).
6. Манусов В.З., Хасанзода Н. Холонический подход для интеллектуальных сетей в концепции Smart Grid при двустороннем потоке энергии // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 3–4. – С. 206–211.
7. Koestler A. The ghost in the machine. – Repr. ed. – London: Penguin, 1990. – 400 p. – ISBN 0-14-019192-5.
8. Giret A., Botti V. Holons and agents // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2004. – Vol. 15, N 5. – P. 645–659.
9. Manusov V.Z., Khasanzoda N. The construction of holonic infrastructure of intelligent networks in the Smart Grid concept with a two-way flow of energy // Problems of the Regional Energetics. – 2017. – Vol. 3, N 35. – P. 76–85.
10. Zhang G., Li W. Flexible holonic organization modeling and cultural evolution // IEEE 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. – Dalian, 2008. – P. 202–212.
11. MICROGRIDS – large scale integration of micro-generation to low voltage grids / N. Hatzigiorgiou, N. Jenkins, G. Strbac, J.A.P. Lopes, J. Ruela, A. Engler // CIGRE 2006. – Paris, France, 2006. – C6-309. – P. 21–28.

12. Манусов В.З., Хасанзода Н., Ахъев Дж.С. Создание интегрированной системы электроснабжения острова Русский и управление ее режимами // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 1–2. – С. 142–145.

13. Grogg K. Harvesting the wind: the physics of wind turbines. – Carleton College, USA: Northfield, 2005. – 42 p.

14. Удалов С.Н., Манусов В.З. Моделирование ветроэнергетических установок и управление ими на основе нечеткой логики. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 200 с.

15. Удалов С.Н., Манусов В.З., Зубова Н.В. Управление ветроэнергетической установкой с изменяемой геометрией лопасти на основе нечеткого контроллера // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 1 (38). – С. 159–173.

Манусов Вадим Зиновьевич, доктор технических наук, профессор кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – применение интеллектуальных информационных технологий и методов искусственного интеллекта для анализа, планирования и оптимизации электроэнергетических систем. Имеет более 200 публикаций, в том числе 5 монографий. E-mail: manusov36@mail.ru

Хасанзода Насрулло, аспирант кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – исследование режимов интеллектуальных сетей с возобновляемыми источниками энергии и управления ими на основе методов искусственного интеллекта. Имеет 12 публикаций. E-mail: nasrullo-5445@mail.ru

Бобоев Шараф Асрорович, аспирант кафедры теоретической и прикладной информатики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – статистические методы анализа данных. Имеет 8 публикаций. E-mail: shboboev@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-175-190

Research on optimal modes of intelligent networks with a two-way energy flow*

V.Z. MANUSOV^a, N. KHASANZODA^b, Sh.A. BOBOEV^c

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a manusov36@mail.ru ^b nasrullo-5445@mail.ru ^c shboboev@mail.ru

Abstract

The need to optimize intelligent system modes in the Smart Grid concept with the function of a two-way energy flow from its distributed generation sources is proved. In this regard, the concept of a generating consumer is introduced for active consumers, which provides a possibility to flexibly regulate energy flows and equalize the load schedule as well as to minimize financial costs of consumed energy. A new notion - the so-called holonic approach – is introduced and justified within the SmartGrid concept as well as a new term “generating consumer-holon” (GC-holon) implying the capability of energy consumers to independently generate electricity by means of renewable energy sources, to accumulate it and exchange the power with other similar GC-holons and with the main generating system. To construct an intelligent network, a holonic structure based on a set of holons (subsystems) is used. The holonic structure assumes subsystems of different nature located at different levels of aggregation and inter-

* Received 06 March 2018.

connected in order to form a hierarchy of self-regulating holons, called Holarchy. According to A. Koestler, holons are simultaneously, both whole and partial. They are basically autonomous, which allows them to ensure their existence independently. A two-way energy flow for the holonic structure assumes a possibility of energy generation and storage due to an internal structure of the electric consumer. The key point in the work is the use of consumers' own wind resources, which are quite large in the coastal zone of the Far East and on the islands. A new mathematical model of optimal power consumption by the generating consumer in the form of a system of nonlinear algebraic equations (SNAU) with a two-way flow of energy is developed. A system for prioritizing the choice of generation sources is developed, which ensures the minimization of the material and financial costs of the electrical consumer.

Keywords: intellectual network, Smart Grid concept, two-way energy flow, generating consumer holon, holarchy, renewable energy sources, wind power station, energy storage, optimization model

REFERENCES

1. Tuballa M.L., Abundo M.L. A review of the development of Smart Grid technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 3, pp. 710–725.
2. Negeri E., Baken N. Smart integration of electric vehicles in an energy community. *Proceedings of the 1st International Conference on Smart Grids and Green IT Systems*, Porto, Portugal, 2012, pp. 25–32.
3. Amin S.M., Wollenberg B.F. Toward a Smart Grid. *IEEE P&E Magazine*, 2005, vol. 3, no. 5, pp. 34–41.
4. Brown R.E. Impact of Smart Grid on distribution system design. *Proceedings of IEEE "Power and Energy Society General Meeting"*, Pittsburgh, 2008, pp. 1–4.
5. European Smart Grids technology platform: vision and strategy for Europe's electricity networks of the future. European Commission Directorate-General for Research Sustainable Energy Systems. European Union, 2006. Available at: http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smart-grids_en.pdf (accessed 17.09.2018).
6. Manusov V.Z., Khasanzoda N. Kholonicheskii podkhod dlya intellektual'nykh setei v kontseptsii Smart Grid pri dvustoronnem potoke energii [A holonic approach for intelligent networks in the concept of Smart Grid with a two-way flow of energy]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2018, no. 3–4, pp. 206–211. (In Russian).
7. Koestler A. *The ghost in the machine*. London, Penguin, 1990. 400 p. ISBN 0-14-019192-5.
8. Giret A., Botti V. Holons and agents. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2004, vol. 15, no. 5, pp. 645–659.
9. Manusov V.Z., Khasanzoda N. The construction of holonic infrastructure of intelligent networks in the Smart Grid concept with a two-way flow of energy. *Problems of the Regional Energetics*, 2017, vol. 3, no. 35, pp. 76–85.
10. Zhang G., Li W. Flexible holonic organization modeling and cultural evolution. *IEEE 4th International Conference on Wireless Communications. Networking and Mobile Computing*, Dalian, 2008, pp. 202–212.
11. Hatzigiorgiou N., Jenkins N., Strbac G., Lopes J.A.P., Ruela J., Engler A. MICROGRIDS – large scale integration of micro-generation to low voltage grids. *CIGRE 2006*, 2006, C6-309, pp. 21–28.
12. Manusov V.Z., Khasanzoda N., Ahyoev J.S. Sozdanie integrirovannoi sistemy elektro-snabzheniya ostrova Russkii i upravlenie ee rezhimami [Creation of an integrated system of power supply for the Russian Island and management of its regimes]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*, 2017, no. 1–2, pp. 142–145. (In Russian).

13. Grogg K. *Harvesting the wind: the physics of wind turbines*. Carleton College, USA, Northfield, 2005. 42 p.
14. Udalov S.N., Manusov V.Z. *Modelirovanie vetroenergeticheskikh ustanovok i upravlenie imi na osnove nechetkoi logiki* [Modeling of wind-driven power plant and their control based on fuzzy logic]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2013. 200 p.
15. Udalov S.N., Manusov V.Z., Zubova N.V. Upravlenie vetroenergeticheskoi ustanovkoi s izmenyaemoi geometriiei lopasti na osnove nechetkogo kontrollera [Control of a wind turbine with variable length blades through fuzzy logic controller]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 1 (38), pp. 159–173.

Для цитирования:

Манусов В.З., Хасанзода Н., Бобоев Ш.А. Исследование оптимальных режимов интеллектуальных сетей с двухсторонним потоком энергии // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 175–190. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-175-190.

For citation:

Manusov V.Z., Khasanzoda N., Boboev Sh.A. Issledovanie optimal'nykh rezhimov intellektual'nykh setei s dvukhstoronnim potokom energii [Research on optimal modes of intelligent networks with a two-way energy flow]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 175–190. doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-175-190.