



ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА

WIND ENERGY

УНИКАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

UNIQUE WIND ENERGY SOLUTIONS

Статья поступила в редакцию 30.04.18. Ред. пер. № 1322-2689-1 The article has entered in publishing office 30.04.18. Ed. reg. No. 1322-2689-1

УДК 621.311

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕТРОВЫХ РЕСУРСОВ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА*

В.З. Манусов, Н. Хасанзода

Новосибирский государственный технический университет
д. 20, просп. К. Маркса, Новосибирск, 630073, Россия
тел.: +7(913) 931-76-67, +7(952) 929-87-81
e-mails: manusov36@mail.ru, nasrullo-5445@mil.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.19-21.012-022

Заключение совета рецензентов: 31.05.18 Заключение совета экспертов: 07.06.18 Принято к публикации: 28.06.18

Показана необходимость оптимизации режимов электропотребления и энергобаланса интеллектуальной сети (Smart Grid) с функцией двустороннего потока энергии от альтернативных источников энергии. 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. Ключевым моментом является использование собственных ветро-ресурсов, которые достаточно велики в прибрежной зоне Дальнего Востока и на островах Русский и Попова. Разработана новая математическая модель оптимального энергобаланса при участии генерирующих потребителей и альтернативных источников энергии в виде ветро-ресурса как интеллектуальной системы с двусторонним потоком энергии. Предложена система выбора приоритетности источников генерации, обеспечивающая минимизацию материально-финансовых затрат электропотребителя. При этом в качестве универсального метода решения оптимизационной мультикритериальной задачи задействован алгоритм роя частиц роевого интеллекта. Новая концепция интеллектуальной сети с активными потребителями и двусторонним потоком энергии от альтернативных источников с функцией аккумуляции позволяет существенно повысить энергоэффективность использования ветро-ресурсов. Учитывая особый статус некоторых территорий в этой зоне и дефицит традиционных энергоресурсов, использование энергии ветровых потоков может в значительной мере решить энергетические проблемы.

Ключевые слова: альтернативные источники энергии; активный потребитель; двусторонний поток энергии; ветроэнергетическая станция; интеллектуальная сеть; приоритетность правил выбора; алгоритм роевого интеллекта.

OPTIMIZATION OF THE FAR EAST WIND RESOURCES ENERGY EFFICIENCY ON THE BASIS OF THE SWARM INTELLIGENCE ALGORITHM

V.Z. Manusov, N. Khasanzoda

Novosibirsk State Technical University
20 K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia
tel.: +7(913) 931 76 67, +7(952) 929 87 81
e-mails: manusov36@mail.ru, nasrullo-5445@mil.ru

*Манусов В.З., Хасанзода Н. Оптимизация энергоэффективности ветровых ресурсов Дальнего Востока на основе алгоритма роевого интеллекта // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2018;19-21:12-22.



The paper shows the necessity of power consumption modes and energy balance optimization of an intelligent network (Smart Grid) with a function of two-way energy flow based on the alternative energy sources. In this regard, the concept of a generating consumer which provides the ability to flexibly regulate energy flows and equalize the load schedule as well as to minimize the financial costs of the consumed energy are introduced for the active consumers. The paper's key point is the use of self wind resources which are quite large in the coastal zone of the Far East and on the Russky and Popov islands. A new mathematical model of the optimal energy balance has been developed with the participation of generating consumers and an alternative source of energy in the form of a wind resource as an intelligent system with a two-way flow of energy. Moreover, the paper proposes a system for selecting the priority of generation sources which minimizes the material and financial costs of the electric consumer. At the same time, the swarm particle of swarm algorithm is used as a universal method for solving the optimization multi-criterion problem. The new concept of an intelligent network with active consumers and a two-way flow of energy from alternative sources with the function of its accumulation allows significantly increasing the energy efficiency of wind resources using. Considering special status of some territories of the Far East and the shortage of energy resources, using of alternative energy of wind flows can largely solve the energy problem.



Key words: alternative energy sources; active consumer; two-way energy flow; wind power station; intelligent network; priority of selection rules; algorithm of swarm intelligence.



Вадим Зиновьевич Манусов
Vadim Manosov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры систем электроснабжения предприятий, Новосибирский государственный технический университет.

Образование: Новосибирский электротехнический институт (1963 г.).

Область научных интересов: применение интеллектуальных информационных технологий и методов искусственного интеллекта для анализа, планирования и оптимизации электроэнергетических систем.

Публикации: 209, в том числе 5 монографий.

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor at the Department of Industrial Power Supply System, Novosibirsk State Technical University.

Education: Novosibirsk Electrotechnical Institute, 1963.

Research interests: application of intelligent information technology and artificial intelligence methods for analysis, planning and optimization of electric power systems.

Publications: 209, including 5 monographs.



Насрулло Хасанзода
Nasrullo Khasanzoda

Сведения об авторе: аспирант кафедры систем электроснабжения предприятий, Новосибирский государственный технический университет.

Образование: Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими (2013 г.).

Область научных интересов: использование возобновляемых источников энергии и управления ими на основе методов искусственного интеллекта.

Публикации: 12.

Information about the author: Post-Graduate Student at the Department of Industrial Power Supply System, Novosibirsk State Technical University.

Education: Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, 2013.

Research interests: use of renewable energy sources and their management based on artificial intelligence methods.

Publications: 12.

1. Введение

В последние десятилетия ветроэнергетические установки (ВЭУ) применяются все шире, так как ветер является возобновляемым и относительно экологически чистым источником энергии. Однако стоимость энергии, вырабатываемой ВЭУ, должна быть сопоставима со стоимостью энергии от ископаемого топлива, которая значительно снизилась за последние два года. Добиться снижения себестоимости ветро-

энергии можно, в частности, за счёт увеличения количества захватываемой ВЭУ энергии.

Наиболее важными задачами управления ВЭУ являются выработка максимально возможной мощности в условиях непостоянства ветра и ограничение частоты вращения для предотвращения механического разрушения ВЭУ. 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 [1–3]. Мощность P , вырабатываемая ВЭУ, при скорости ветра v , площади, ометаемой ветроколесом, A и плотности воздуха ρ определяется энергией потока воздуха E в единицу времени t и может быть записана в виде следующего выражения:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} C_p \frac{(Av\rho)v^2}{t} = \frac{1}{2} C_p A \rho v^3, \quad (1)$$

где C_p – коэффициент мощности, характеризующий эффективность использования энергии потока. В зависимости от скорости и направления ветра необходимо менять характеристики ВЭУ, то есть осуществлять управление ею для повышения значения C_p и максимизации вырабатываемой мощности P .

Актуальность исследований обусловлена необходимостью оптимизации режимов интеллектуальной сети на основе активных генерирующих потребителей с функцией двустороннего потока энергии как от энергосистемы, так и от альтернативных источников энергии. Такие интеллектуальные сети создаются на основе концепции Smart Grid, которая обеспечивает двусторонний поток электрической энергии и коммуникативную информацию между энергообъектами и потребителями за счет применения новейших технологий, инструментов, позволяющих повысить эффективность работы электросетевого комплекса.

Впервые термин Smart Grid использован авторами S.M. Amin и B.F. Wollenberg в их публикации «К направлению интеллектуальной сети» [4]. Применение этого термина за рубежом было связано с чисто рекламными названиями специальных контроллеров,

которые были предназначены для управления режимом работы и синхронизации автономных ветрогенераторов, отличающихся нестабильным напряжением и частотой, с электрической сетью. Затем термин стал употребляться для обозначения микропроцессорных счетчиков электроэнергии, способных самостоятельно накапливать, обрабатывать, оценивать информацию и передавать ее по специальным каналам связи и даже через Интернет [5, 6].

В Smart Grid поддерживаются двусторонние потоки электроэнергии и информации, поэтому покупатели электроэнергии могут приобретать рыночную информацию о состоянии сети и возвращать энергию в сеть [7]. Таким образом, обмен информацией и мощностью становится более гибким и повышает эффективность управления мощностью для более надежного распределения электроэнергии. Посредством периодических информационных сообщений, центр управления контролирует сети в режиме реального времени, а генерирующие потребители (ГП) приобретают обновленную информацию о ценах в режиме реального времени. Можно считать, что двусторонние потоки электроэнергии и информации являются основой управления мощностью в режиме on-line и многими другими приложениями Smart Grid [8].

Представленная статья будет полезна как средство минимизации расходов электропотребителя при использовании возобновляемых и альтернативных источников энергии, что особенно актуально для прибрежной зоны Дальнего Востока.

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
α	Угол атаки лопасти
ψ	Угол между направлением ветра и положением гондолы
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
A	Правила работы роевого алгоритма
A	Ометаемая поверхность, м ²
C_p	Коэффициент эффективности ВЭУ
C_r	Критическая, соответствующая прогнозу
H	Высокая, соответствующая прогнозу
I	Вход роевого алгоритма
ij	Интервал времени
L	Большое отклонение от направления гондолы
M	Объект для обмена опытом между частицами S
M	Среднее отклонение от направления гондолы
mi	Суммарные результаты умножения каждой строки
N	Нормальная, соответствующая прогнозу
O	Выход роевого алгоритма
P	Мощность, МВт
P	Параметры, используемые в правилах A
S	Малое отклонение от направления гондолы
S	Множество частиц роя
SI	Алгоритм роевого интеллекта
V	Скорость ветра, м/с
VH	Очень высокая, соответствующая прогнозу

<i>Продолжение списка обозначений</i>	
Z	Направление ветра, которое совпадает с направлением гондолы
<i>Буквы русского алфавита</i>	
C	Матрица цен
c	Цена электроэнергии
M	Суммарный результат
<i>Индексы верхние</i>	
Акк	Аккумулятор
<i>Индексы нижние</i>	
Наг	Нагрузка
П	Потребление
Ч	Часы
ЭС	Энергосистема
<i>Аббревиатуры</i>	
PSO	Алгоритм роя частиц (Particle Swarm Optimization)
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
ВЭС	Ветроэлектростанция
ВЭУ	Ветроэнергетическая установка
ГП	Генерирующий потребитель
СЛАУ	Системы линейных алгебраических уравнений

2. Теоретический анализ

Скорость ветра является одним из наиболее важных параметров для оценки мощности, которую можно получить от ВЭУ. Для применения нечеткой логики в задачах ветроэнергетики необходимо для начала описать скорость ветра с применением лингвистических переменных, которые позволяют задавать значения переменных с помощью слов и предложений естественного языка. При создании нечетких моделей одним из основных этапов является построение функции принадлежности, описывающей семантику базовых значений переменной.

Известно, что скорость ветра может быть представлена шкалой Бофорта [9], в которой скорость разбита на 9 интервалов. При этом интервалы для самого слабого и самого сильного ветров можно исключить, так как при минимальной скорости ветра нет достаточного воздействия на ветроэнергетическую установку, а при самой сильной – установки отключаются во избежание разрушения. Шкалу Бофорта необходимо описать функциями принадлежности лингвистических переменных, то есть указать, какая скорость ветра v , с какой степенью принадлежности относится к какой лингвистической переменной. В рассматриваемом случае используются так называемые LR-функции [10], которые можно легко представить графически (рис. 1).

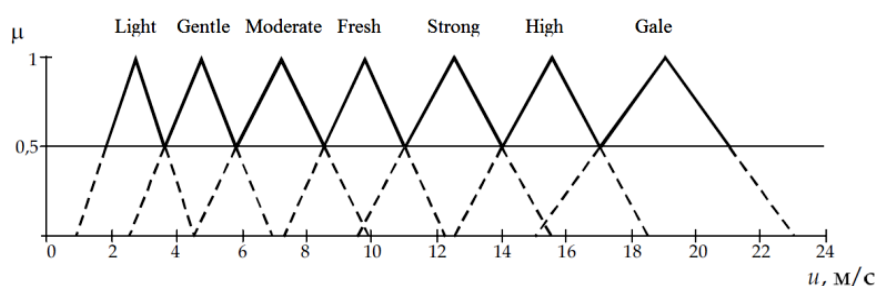


Рис. 1 – Нечеткие скорости ветра
Fig. 1 – Fuzzy wind velocities

На рис. 1 показано, что, например, скорость ветра 11 м/с может быть равно отнесена как к свежему ветру (fresh), так и к сильному (strong), а скорость ветра 18 м/с скорее относится к очень крепкому ветру (strong), но в некоторой степени может быть отнесена и к крепкому (gale).

На вход регулятора подается скорость ветра v_0 и направление ψ (угол между направлением ветра и положением гондолы), на выходе регулятора – команды по управлению поворотом гондолы $d\psi$, углом атаки лопасти α и длиной лопасти ветроколеса ΔL . На рис. 2 графически представлены функции принадлежности скоростей ветра, а на рис. 3 – направлений ветра.

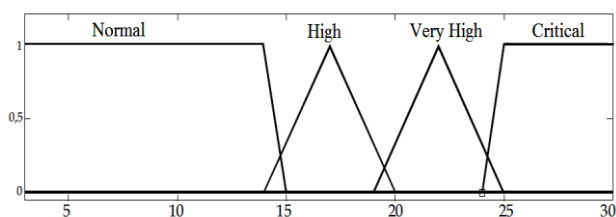


Рис. 2 – Функции принадлежности скорости ветра
Fig. 2 – The wind velocity membership functions

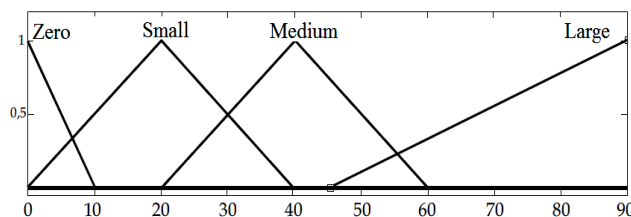


Рис. 3 – Функции принадлежности направления ветра
Fig. 3 – The wind direction membership functions

Для сокращения дальнейшего описания обозначим скорости ветра от рабочей до критической как N , H , VH , Cr , а угла ψ от нулевого до большого как Z , S , M , L . Аналогично задаются функции принадлежности для выходных величин: угла атаки лопасти – Z , S , M , L (рис. 4).

вают целесообразность строительства двух ветроэлектростанций (ветропарков) [11].

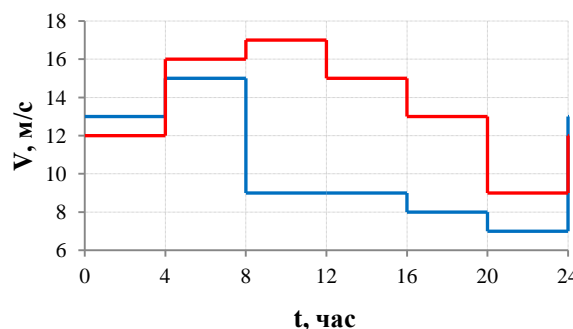


Рис. 5 – Скорость ветра на островах Русский (синяя линия) и Попова (красная линия)
Fig. 5 – Wind velocity at Russky (blue line) and Popov (red line) Islands

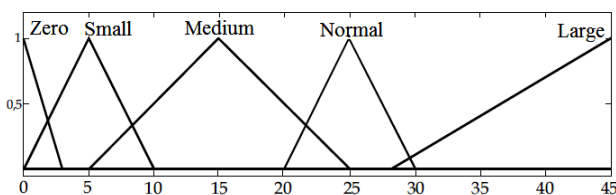


Рис. 4 – Функции принадлежности угла атаки лопасти
Fig. 4 – The membership function of the blade angle of attack

Работа нечеткого регулятора происходит по следующей схеме (подробное описание работы данного регулятора можно найти в [9]).

Если будут осуществлены планы по развитию концепции интеллектуальной сети, то предусмотрено строительство новых объектов – «Дальневосточной ветроэлектростанции (ВЭС)» на островах Русский (до 16 МВт) и Попова (до 20 МВт) [12, 13]. Несмотря на то что с данным проектом возникли некоторые трудности, от планов по его реализации не отказались [14]. Так, был наработан опыт проведения и обработки ветроизмерений, выбора оборудования, оптимизации размещения ветроустановок, подготовки инфраструктуры и логистики. По результатам работы была разработана проектная документация на объекты ветропарка на о. Попова (строительство схемы выдачи мощности, подготовка объектов инфраструктуры и непосредственно ветроагрегатов). Кроме того, концепция, представленная авторами данной статьи, будет полезна и для других проектов альтернативной энергетики.

1. Значения скорости и направления ветра проходят этап фазификации, то есть определения функций принадлежности для входных переменных. В результате фазификации конкретным значениям v_0 и ψ ставятся в соответствие уровни принадлежности. Например, если угол ψ имеет значение 35° , то он является малым с принадлежностью 0,25, средним с принадлежностью 0,75 и нулевым, большим с нулевой принадлежностью.

2. Находятся уровни отсечения для предпосылок каждого нечеткого правила, в результате формируются усеченные функции принадлежности для выходных переменных по каждому из правил.

3. Найденные усеченные функции принадлежности объединяются, таким образом, по каждой выходной переменной получается некоторое итоговое нечеткое подмножество. При этом применяется алгоритм Мамдани.

4. Для каждой из выходных переменных выполняется дефазификация, то есть определение конкретного выходного значения.

3. Оптимизация режимов и энергобаланса генерирующих потребителей

Метеорологические данные о скорости ветра на Тихоокеанском побережье России (рис. 5) доказы-

Мощность, которую выдает ВЭС острова Попова (рис. 6), стабилизирована на уровне предельной для ВЭУ типа 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 вырабатываемой энергии, избыточная электроэнергия участвует в обмене в качестве двустороннего потока энергии.

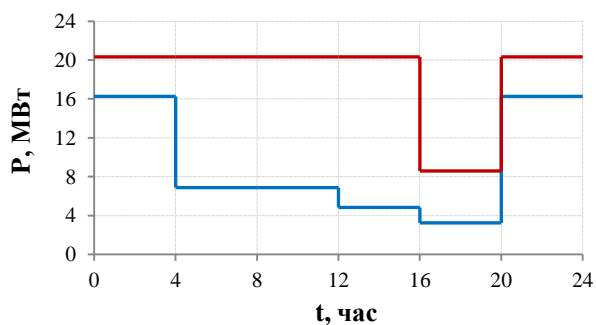


Рис. 6 – Суточные графики выдачи мощности ВЭС на островах Русский (синяя линия) и Попова (красная линия)

Fig. 6 – Daily curve of WPP power generation Rusky (blue line) and Popov (red line) islands

Уравнение баланса для данной системы будет иметь следующий вид:

$$P_{ЭС} + P_{ВЭУ} \pm P_{Акк} = P_{П} + \Delta P, \quad (2)$$

где $P_{ЭС}$ – мощность от ЭС; $P_{ВЭУ}$ – мощность ВЭУ; $P_{Акк}$ – мощность аккумуляторной батареи; $P_{П}$ – мощность потребителя; ΔP – потери, МВт.

В интегральной форме

$$\int_0^{24} P_{ЭС}(t) dt + \int_0^{24} P_{ВЭУ}(t) dt \pm \int_0^{24} P_{Акк}(t) dt = \int_0^{24} P_{П}(t) dt + \int_0^{24} \Delta P(t) dt. \quad (3)$$

В концепции двустороннего потока энергии открывается возможность получения электроэнергии от трёх источников: энергосистемы, ВЭУ и накопителя. Стоимости этих видов энергии различны, кроме того, они определяются по двум зонам тарифов стоимости энергии энергосистемы.

Для этой цели была решена задача оптимизации режимов по минимуму эксплуатационных издержек на основе алгоритма роевого интеллекта. Любой алгоритм роевого интеллекта можно представить как [15–18]:

$$SI = \{S, M, A, P, I, O\}, \quad (4)$$

где S – множество частиц роя; M – объект для обмена опытом между частицами S ; A – правила работы роевого алгоритма; P – параметры, используемые в правилах A ; I и O – вход и выход роевого алгоритма, посредством которых он взаимодействует с решаемой задачей и управляющей системой.

В данной работе применяется алгоритм роя частиц (Particle Swarm Optimization – PSO [19, 20]), как наиболее хорошо зарекомендовавший себя на практике.

4. Математическая модель алгоритма роя частиц

При переходе к математической модели алгоритма роя частиц соблюдают следующие правила:

- каждая частица в определенный момент времени находится в некоторой точке пространства, заданной вектором координат X ;
- каждая частица характеризуется вектором скоростей V ;
- частицы оценивают свое положение в пространстве по значению некоторого критерия $f(X)$;
- каждая частица знает позицию в пространстве PX , в которой она была и в которой значение $f(X)$ было максимальным (лучшую свою позицию);
- каждая частица знает лучшую позицию в пространстве среди позиций PX всех частиц (позиция GX , в которой значение $f(X)$ максимально);
- частицы имеют тенденцию стремиться к лучшим позициям PX , в которых были сами, и к общей наилучшей позиции GX ;
- на скорость частиц влияют случайные факторы и инерция.

Предположим, что решается задача нахождения максимума функции вида $f(X)$, где X – вектор варьируемых параметров, которые могут принимать значения из некоторой области D . В алгоритме PSO, согласно выражению (4), $S = \{\text{множество частиц}\}$; $M = GX$; A – правила работы алгоритма, приведенные ниже; P – параметры алгоритма, также приведенные ниже ($\alpha_1, \alpha_2, \omega, V_{\max}$); $I = \{f(X), D\}$; $O = \{GX, f(GX)\}$.

Алгоритм PSO завершается при достижении заданного числа итераций, либо при достижении удовлетворительного решения, либо в том случае, когда в течение определенного времени не происходит улучшения уже найденного решения. Таким образом, алгоритм можно записать следующим образом.

1. На первой итерации для случайного распределения роевых частиц в области решения выбирают начальные скорости, которые могут быть нулевыми или случайными. Позиции у каждой частицы равны – PX любой из частиц.

2. Вычислить значения оптимизируемой функции $f(X)$ для каждой частицы. Если найденное значение больше $f(X)$ или $f(GX)$, то обновить значение PX и GX соответственно.

3. Вычислить новые значения скоростей V каждой частицы с учетом коэффициента ограничения V_{\max} .

4. Вычислить новые координаты X каждой частицы.

5. Если выполнено условие завершения, закончить алгоритм, иначе перейти к шагу 2 и увеличить счетчик итераций.

6. Результатом работы алгоритма является позиция GX . Наибольший интерес представляют собой шаги 3 и 4, точнее правила (формулы) вычисления скоростей и позиций. Существует огромное множество вариантов этих формул, приведем один из наиболее простых.

Если для некоторой частицы известны X, V, PX , и известно GX для всего роя, то новое значение скорости каждой частицы на шаге 3 можно определить так:

$$V = \omega V + rnd_1(PX - X)\alpha_1 + rnd_2(GX - X)\alpha_2, \quad (5)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \omega$ – параметры алгоритма, определяющие особенности поведения роя; rnd_1 и rnd_2 – векторы случайных вещественных чисел, элементы которых распределены равномерно от 0 до 1, их размерности равны размерности пространства поиска решений. При этом задается ограничение на максимальную по модулю скорость V_{\max} [21].

7. Новое положение частицы на шаге 4

$$X = X + V. \quad (6)$$

8. Если X оказалось за пределами пространства поиска решений, то X обычно присваивают допустимое ближайшее значение.

После оптимизации экономических затрат и финансовых расходов на потребляемую энергию решается задача оптимального распределения двусторонних потоков энергии. Эта задача может быть описана как система нелинейных алгебраических уравнений с известным вектор-столбцом правых членов уравнения. На каждом шаге итеративного процесса во времени рассматривается система линейных алгебраических уравнений, представленных ниже.

Предлагается следующий алгоритм решения поставленной задачи. Примем исходные данные:

$P_{ГП}$ – потребляемая мощность потребителей о. Русский или о. Попова;

$P_{ЭС}$ – передаваемая мощность энергосистемы;

$P_{\max}^{ВЭУ}$ – максимально возможная мощность, вырабатываемая ВЭУ о. Русский или о. Попова, где $0 \leq P_{\max}^{ВЭУ} \leq P_{\text{ном}}^{ВЭУ}$;

$P_{\max}^{Акк}$ – максимально передаваемая мощность накопителей о. Русский или о. Попова, где $0 \leq P_{\max}^{Акк} \leq P_{\text{ном}}^{Акк}$.

Для оптимизации расходов на 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.

$$\begin{cases} c_{11} \cdot P_{ЭС} + c_{12} \cdot P_{ВЭУ} + c_{13} \cdot P_{Акк} = m_1 \\ c_{21} \cdot P_{ЭС} + c_{22} \cdot P_{ВЭУ} + c_{23} \cdot P_{Акк} = m_2, \\ c_{31} \cdot P_{ЭС} + c_{32} \cdot P_{ВЭУ} + c_{33} \cdot P_{Акк} = m_3 \end{cases} \quad (7)$$

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

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

Решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) на каждом шаге итерации осуществляется 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.

Задача минимизации расходов решается по заданной модели:

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

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

ограничениях:

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

5. Практическая реализация и обсуждение результатов

В качестве практической реализации расчета выбран суточный график электропотребления в один из дней осеннего периода с учетом возможной генерации ВЭС и аккумулирования энергии. Из приведённых графиков на рис. 7а видно, что при двухзонном тарифе стоимости электроэнергии от энергосистемы, когда дневной тариф действует с 7 часов утра до 23 часов вечера, а ночной сниженный тариф – с 23 часов вечера до 7 часов утра оптимальное электропотребление складывается следующим образом:

– аккумулирование 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 аккумулировать 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.

Решение оптимизационной задачи минимизирует финансовые затраты на пользование всеми источниками генерации за каждый час суточного графика и в целом на суточном интервале. График минимальных финансовых затрат за сутки представлен на рис. 7б.



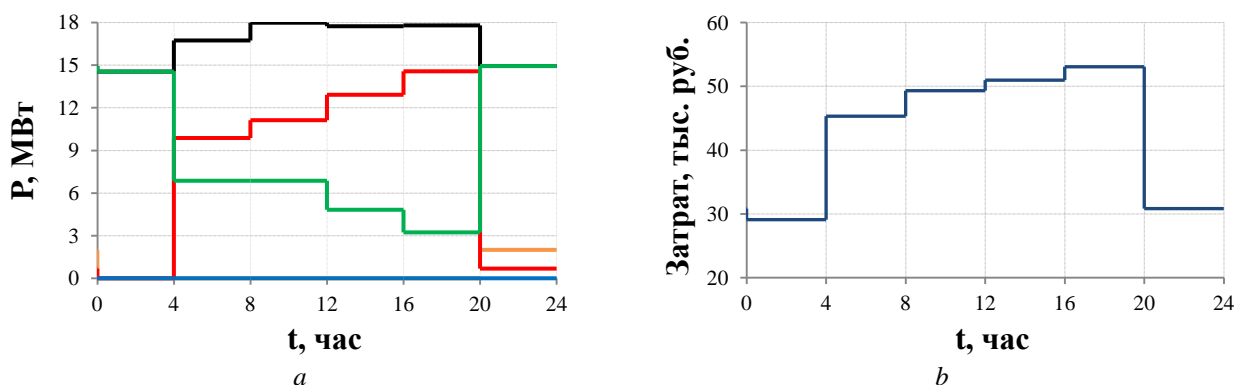


Рис. 7 – Одновременное использование электроэнергии всех видов: а) распределение мощности в ГП1 ($P_{наг}$ – черная линия, $P_{накоп}$ – оранжевая линия, $P_{ЭС}$ – красная линия, $P_{ВЭУ}$ – зеленая линия; $P_{Акк}$ – синяя линия); б) минимальная расход ГП1
Fig. 7 – Simultaneous use of all types of electric power: а) power distribution to GC1 ($P_{наг}$ is a black line; $P_{накоп}$ is an orange line; $P_{ЭС}$ is a red line; $P_{ВЭУ}$ is a green line; $P_{Акк}$ is a blue line); б) GC1 minimum consumption

Для условий второго варианта, когда подключен ГП2 (о. Попов) со своей ВЭС мощностью до 20 МВт, появляется возможность не только минимизации расходов на электроэнергию, но и продажи электроэнергии в энергосистему или осуществления взаимовыгодного обмена энергией между генерирующими потребителями.

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

Элеktропотребление мощности о. Русский (ГП1), МВт

Таблица 1

Power consumption of Russky Island (GC_1), MW

Table 1

Время суток, ч	0	4	8	12	16	20	24
$P_{наг}$	14,93	14,54	16,73	17,98	17,73	17,79	14,93
$P_{Акк1}$	2	0	0	0	0	0	2
$P_{ЭС}$	0	0	0	0	0	9,91	0
$P_{ВЭУ1}$	16,25	14,54	6,86	6,86	4,82	3,23	16,25
$P_{Акк1'}$	0	0	0	0	0	0	0
ГП1 → ГП2	0	0	0	0	0	0	0
ГП1 → ЭС	0	1,71	0	0	0	0	0
ГП2 → ГП1	0,68	0	9,87	11,12	12,91	4,65	0,68

В табл. 2 выполнены аналогичные расчеты для о. Попова (ГП2). Показано, что в связи с незначительной собственной нагрузкой и мощным ветропарком

почти всегда имеется избыток ветровой энергии за счет ветра, который может быть направлен по обмену для потребителя ГП1 и в энергосистему.

Элеktропотребление мощности острова Попова (ГП2), МВт

Таблица 2

Power consumption of Popov Island (GC_2), MW

Table 2

Время суток, часы	0	4	8	12	16	20	24
$P_{наг}$	3,56	3,27	3,74	3,82	3,69	3,92	3,56
$P_{Акк2}$	2	0	0	0	0	0	2
$P_{ЭС}$	0	0	0	0	0	0	0
$P_{ВЭУ2}$	5,56	3,27	3,74	3,82	3,69	3,92	5,56
$P_{Акк2'}$	0	0	0	0	0	0	0
ГП2 → ГП1	0,68	0	9,87	11,12	12,91	4,65	0,68
ГП2 → ЭС	14,07	17,04	6,7	5,37	3,71	0	14,07
ГП1 → ГП2	0	0	0	0	0	0	0

В табл. 3 приведены оптимальные финансовые затраты при покрытии графика нагрузки из всех возможных источников питания, включая альтерна-

тивные источники энергии. Оптимизация выполнена с помощью алгоритма роевого интеллекта (роя частиц).

Оптимизация финансовых затрат на электропотребление (тыс. руб.)
 Optimization of financial costs for electricity consumption (thousand rubles)

Таблица 3

Table 3

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

Показано, что несмотря на минимизацию расходов активный потребитель (ГП1) не получает дополнительных доходов, так как его собственное электропотребление не может быть покрыто даже при двусторонних потоках энергии.

Заключение

Новая концепция организации интеллектуальной сети в технологии Smart Grid, представленная в данной работе, отличается возможностью двустороннего потока энергии для активного генерирующего потребителя. Это позволило выдвинуть идею интеллектуальной системы электроснабжения с реализацией двусторонних потоков энергии и функцией её аккумуляирования в накопителях. Возможность двустороннего потока энергии подразумевает то, что у электропотребителя существует выбор получения энергии от альтернативных источников: энергосистемы, ВИЭ и аккумулятора.

Предложенная и разработанная система нелинейных алгебраических уравнений даёт возможность находить оптимальное соотношение альтернативных источников энергии для активных потребителей (ГП), что, в свою очередь, позволяет оптимальным образом расходовать все доступные ему виды энергии, включая ВИЭ с функцией её аккумуляирования. Это обеспечивает повышение энергоэффективности электрооборудования и ресурсосбережение.

Алгоритм роевого интеллекта решает мультикритериальную задачу минимизации финансовых расходов на суточном или ином интервале с возможностью определения глобального минимума, а программный продукт, разработанный на этой основе, позволяет существенно улучшить режимы интеллектуальной системы.

Список литературы

[1] Grogg, K. *Harvesting the Wind: The Physics of Wind Turbines* / K. Grogg. – Carleton College. USA: Northfield, 2005. – 42 p.

[2] Manusov, V.Z. Construction and optimization of a power complex with a distributed generation on the basis of renewables and methods of artificial intelligence (on the example of the Republic of Tajikistan) / V.Z. Manusov // Manusov V.Z. E3S Web of Conferences. International Conference on Sustainable Cities (ICSC 2016) / V.Z. Manusov, A.K. Kirgizov, J.S. Ahyoev. – 2016. – Vol. 6. – Art. 03006 (7 p.).

[3] Манусов, В.З. Исследование вопроса интеграции ветровой генерации в работу новосибирской энергетической системы / В.З. Манусов, Ш.К. Халдаров // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 4. – С. 216–219.

[4] Amin, S.M. *Toward a Smart Grid* / S.M. Amin // Amin, S.M. IEEE P&E Magazine. / S.M. Amin, B.F. Wollenberg. – 2005. – Vol. 3. – No. 5. – P. 34–41

[5] Brown, R.E. Impact of Smart Grid on Distribution System Design / R.E. Brown // in Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting, Pittsburgh / R.E. Brown. – PA., 2008. – P. 1–4.

[6] Манусов, В.З. Холонический подход для интеллектуальных сетей в концепции Smart Grid при двустороннем потоке энергии / В.З. Манусов, Н. Хасанзода // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 3–4. – С. 206–211.

[7] Negeri, E. Smart integration of electric vehicles in an energy community / E. Negeri // Negeri E. in Proceedings of the 1st International Conference on Smart Grids and Green IT Systems / E. Negeri, N. Baken. – 2012. – P. 25–32.

[8] Манусов, В.З. Построение холонической инфраструктуры интеллектуальных сетей в концепции Smart Grid с учетом двустороннего потока энергии [Электронный ресурс] / В.З. Манусов, Н. Хасанзода



// Problems of the Regional Energetics: E-Journal. – 2017. – Vol. 3. – No. 35. – P. 76–85. – Режим доступа: http://journal.ie.asm.md/assets/files/08_03_35_2017.pdf – (Дата обращения: 25.03.18.).

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

[10] Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман. – М.: Радио и связь, 1982. – 483 с.

[11] Расписание погоды. Архив погоды во Владивостоке [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://rp5.ru/archive.php?wmo_id=31960&lang=ru – (Дата обращения: 10.04.2018).

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

[13] Силин Н.В. К вопросу внедрения инновационных технологий Smart Grid в систему электроснабжения острова Русский / Н.В. Силин // Силин Н.В. Современные технологии и развитие политехнического образования Международная научная конференция / Н.В. Силин, В.А. Кислюков, Н. Хасанзода, Е.П. Манаков, Ф.М. Рахимов. – Владивосток, ДВФУ, 2016. – С. 382–386.

[14] Энергия ветра для Владивостока оказалась нерентабельной [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.zrpress.ru/zr/2012/2/50444/> (Дата обращения: 21.04.18).

[15] Матренин, П.В. Системное описание алгоритмов роевого интеллекта / П.В. Матренин, В.Г. Секаев // Программная инженерия. – 2013. – № 12. – С. 39–45.

[16] Jamian, J.J. A New Particle Swarm Optimization Technique in Optimizing Size of Distributed Generation / J.J. Jamian [et al.] // International Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2012. – Vol. 1. – P. 137–146.

[17] Zhu, Y. Overview of swarm intelligence / Y. Zhu, X. Tang // Computer Application and System Modeling. – 2010. – Vol. 9. – P. 400–409.

[18] Engelbrecht, A.P. Fundamentals of Computational Swarm Intelligence / A.P. Engelbrecht, 2005. – 672 p.

[19] Kennedy, J. Particle swarm optimization / J. Kennedy // Kennedy J. Proc. IEEE International Conference on Neural Networks / J. Kennedy, R. Eberhart. – 1995. – Vol. 4. – P. 1942–1948.

[20] Fan, H. A modification to particle swarm optimization algorithm / H. Fan // Engineering Computations: International Journal for Computer-Aided Engineering. – 2002. – Vol. 19. – No. 8. – P. 970–989.

[21] Matrenin, P.V. Particle Swarm optimization with velocity restriction and evolutionary parameters selection for scheduling problem / P.V. Matrenin // Matrenin P.V. Proc. International Siberian Conference

Control and Communications / P.V. Matrenin, V.G. Sekaev. – Omsk. – 2015. – P. 1–5.

References

[1] Grogg K. Harvesting the Wind: The Physics of Wind Turbines. Carleton College. USA: Northfield, 2005; 42 p.

[2] Manusov V.Z., Kirgizov A.K., Ahyoev J.S. Construction and optimization of a power complex with a distributed generation on the basis of renewables and methods of artificial intelligence (on the example of the Republic of Tajikistan). E3S Web of Conferences. *International Conference on Sustainable Cities (ICSC 2016)*, 2016; 6: Art. 03006 (7 p.).

[3] Manusov V.Z., Haldarov Sh.K. Research the issue of wind energy system integration in Novosibirsk energy system operation (Issledovanie voprosa integracii vetrovoi generacii v rabotu novosibirskoi energeticheskoi sistemy). *Scientific problems of transport in Siberia and the Far East (Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka)*, 2015;(4):216–219 (in Russ.).

[4] Amin S.M., Wollenberg B.F. Toward a Smart Grid. *IEEE P&E Magazine*, 2005;3(5):34–41.

[5] Brown R.E. Impact of Smart Grid on Distribution System Design. *In Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Pittsburgh, 2008; pp. 1–4.

[6] Manusov V.Z., Khasanzoda N. A holonic approach for intelligent networks in the concept of Smart Grid with a two-way flow of energy (Holonicheskii podkhod dlya intellektual'nykh setei v koncepcii Smart Grid pri dvustoronnem potoke energii). *Scientific problems of transport in Siberia and the Far East (Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka)*, 2018;(3–4):206–211 (in Russ.).

[7] Negeri E., Baken N. Smart integration of electric vehicles in an energy community. *In Proceedings of the 1st International Conference on Smart Grids and Green IT Systems*, 2012; pp. 25–32.

[8] 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 (Postroyeniye holonicheskoi infrastruktury intellektual'nykh setei v kontsepcii Smart Grid s uchedom dvustoronnego potoka energii). *Problems of the Regional Energetics: E-Journal*, 2017;3(35):76–85. Available on: http://journal.ie.asm.md/assets/files/08_03_35_2017.pdf (03.25.18) (in Russ.).

[9] Udalov S.N., Manusov V.Z. Modeling of wind-driven power plant and their control based on fuzzy logic (Modelirovaniye vetroenergeticheskikh ustanovok i upravleniye imi na osnove nechetkoi logiki). Novosibirsk, NSTU Publ., 2013; 200 p. (in Russ.).

[10] Kofman A. Introduction to the theory of fuzzy sets (Vvedeniye v teoriyu nechetkikh mnozhestv). Moscow: Radio and Communication Publ., 1982; 483 p. (in Russ.).



[11] Time schedule Prognosis. Weather archive in Vladivostok (Raspisanie Pogody. Arhiv pogody vo Vladivostoke). Available on: http://rp5.ru/archive.php?wmo_id=31960&lang=ru (04.10.18.) (in Russ.).

[12] Manusov V.Z., Khasanzoda N., Akh'eev Dzh.S. Creation of an integrated system of power supply for the Russian Island and management of its regimes (Sozdanie integrirovannoi sistemy elektrosnabzheniya ostrova Russkii i upravlenie ee rezhimami). *Scientific problems of transport in Siberia and the Far East (Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka)*, 2017;(1-2):142-145 (in Russ.).

[13] Silin N.V., Kislyukov V.A., Khasanzoda N., Manakov E.P., Rakhimov F.M. To the issue of introduction of innovative technologies Smart Grid in the power supply system of the island of Russian (Sovremennye tekhnologii i razvitiya politekhnicheskogo obrazovaniya). Modern Technologies and Development of Polytechnic Education International Scientific Conference. Vladivostok: FEPU Publ., 2016; pp. 382-386 (in Russ.).

[14] Wind energy for Vladivostok turned out to be unprofitable (Energiya vetra dlya Vladivostoka okazalas' nerentabel'noi) [E-resource]. Available on: <http://www.zrpress.ru/zr/2012/2/50444/> (04.21.18.).

[15] Matrenin P.V., Sekaev. Systems approach to swarm intelligence (Sistemnoe opisanie algoritmov roevogo intellekta). *Programmnaia inzhenerija*, 2013;12:39-45 (in Russ.).

[16] Jamian J.J. A New Particle Swarm Optimization Technique in Optimizing Size of Distributed Generation. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2012;1:137-146.

[17] Zhu Y., Tang X. Overview of swarm intelligence. *Computer Application and System Modeling*, 2010;9:400-409.

[18] Engelbrecht A.P. Fundamentals of Computational Swarm Intelligence, 2005; 672 p.

[19] Kennedy J. Particle swarm optimization. *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks*, 1995;4:1942-1948.

[20] Fan H. A modification to particle swarm optimization algorithm. *Engineering Computations: International Journal for Computer-Aided Engineering*, 2002;19(8):970-989.

[21] Matrenin P.V., Sekaev V.G. Particle Swarm optimization with velocity restriction and evolutionary parameters selection for scheduling problem. *Proc. International Siberian Conference Control and Communications*, 2015; pp. 1-5.

Транслитерация по BSI



CWEE 2019
SHANGHAI

21-23 April 2019
Shanghai New International Expo Centre

China (Shanghai) International Wind Energy Exhibition

China (Shanghai) International Wind Energy Exhibition & Conference 2019

Китайская международная выставка и конференция по ветроэнергетике

21-23 апреля 2019 года

Китай, Шанхай, Shanghai New International Expo Centre (SNIEC)

- Ветрогенераторы
- Ветряное оборудование и комплектующие:
 - лопасти и соответствующие материалы,
 - композитные материалы,
 - коробки передач,
 - подшипники,
 - трансформаторные коробки,
 - системы управления
- Солнечная и ветроэнергетика и сопутствующие технологии

expotar.ru по материалам www.china-wpower.com

