

УДК 620.92  
ББК 31.27-02

Е.Н. СОСНИНА, А.В. ШАЛУХО, Н.И. ЭРДИЛИ

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ ВИРТУАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ\*

*Ключевые слова:* виртуальная электростанция, распределенная генерация, возобновляемые источники энергии, энергообмен, мультиагентный подход.

*Развитие распределенной энергетики на основе возобновляемых источников энергии – одно из важнейших направлений обеспечения энергетической безопасности потребителей электроэнергии и снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду. Объединение распределенных источников электроэнергии в виртуальные электростанции (ВиЭС) общей системой управления позволяет эффективнее использовать потенциал возобновляемых источников энергии. Предложен мультиагентный подход к управлению энергообменом в электрической сети виртуальной электростанции с установками распределенной генерации. Разработаны алгоритмы работы агентов генерации и нагрузки для управления энергообменом. Алгоритмы учитывают экологичность энергоустановок и позволяют максимально использовать потенциал возобновляемых источников энергии, обеспечивая баланс электрической мощности в виртуальной электростанции и минимальные потери при ее передаче. Предложенный подход рассмотрен на примере виртуальной электростанции, объединяющей на напряжении 20 кВ десять децентрализованных систем электроснабжения с источниками распределенной генерации различных типов. Виртуальная электростанция имеет возможность обмена электроэнергией с централизованной энергосистемой. С помощью программных комплексов JADE и «RastrWin» проведено исследование эффективности мультиагентной системы управления энергообменом в виртуальной электростанции с учетом рейтинга экологичности установок распределенной генерации. Результаты исследования показали, что применение мультиагентного подхода к управлению виртуальной электростанцией позволило повысить долю использования возобновляемых источников энергии и снизить потери мощности в электрической сети.*

**Введение.** Для обеспечения энергетической безопасности России и устойчивого электроснабжения удаленных территорий важным направлением является развитие распределенной генерации (РГ), т.е. увеличение производства электроэнергии рядом с ее потребителями за счет сооружения энергоустановок малой и средней мощности (до 25 МВт) [1, 6, 8]. По данным на 2021 г., суммарная мощность объектов РГ в России составила около 23 ГВт (примерно 10% общего энергобаланса), в том числе в эксплуатации находилось более 250 электростанций на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) суммарной установленной мощностью около 1 ГВт. До 2035 г. планируется строительство электростанций на основе ВИЭ суммарной мощностью 8 ГВт [4].

Однако эффективность использования установок РГ (как для потребителей, так и для электроэнергетической системы) существенно ниже потенциально

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00541).

возможной. Большинство энергоустановок работает с низкой загрузкой, вовлечение ВИЭ в энергооборот минимально, а системы с РГ развиваются стихийно.

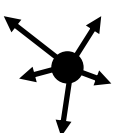
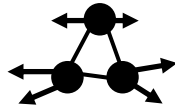

В соответствии с Концепцией «Интеллектуальной энергетической системы России» [9], а также Национальной технологической инициативой «Энерджинет» [2] будущее РГ связано с созданием виртуальных электростанций (ВиЭС) – интеллектуальных электротехнических систем, которые объединяют децентрализованные источники электроэнергии (ЭЭ), системы накопления и потребители ЭЭ (в том числе, с управляемой нагрузкой) на основе общей системы управления (СУ) [7]. Особенностью ВиЭС является возможность многостороннего энергетического и информационного обмена между объединенными энергообъектами и централизованной электрической сетью [3], обеспечивающая максимальное использование мощности распределенных источников ЭЭ и в первую очередь – возобновляемых.

Работа направлена на исследование и разработку подхода к управлению энергообменом в ВиЭС, который позволит учесть экологичность энергоустановок (ЭУ) РГ и максимально использовать потенциал ВИЭ.

**Анализ систем управления ВиЭС.** СУ должна обеспечивать требуемые параметры режима работы ВиЭС (напряжение и частота) [11, 14] при минимальных затратах на производство ЭЭ [10] и получении наибольшей прибыли от ее продажи [15, 12]. Для разработки подхода к эффективному управлению энергообменом в ВиЭС с учетом экологичности ЭУ РГ проведен сравнительный анализ существующих СУ источниками РГ (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительный анализ систем управления РГ

Характеристика СУ	Система управления		
	централизованная	децентрализованная	распределенная
Сложность реализации	относительно легкая	средней сложности	сложная
Скорость принятия решений	средняя при большом числе объектов	высокая при большом числе объектов	высокая при большом числе объектов
Количество точек управления	одна 	более одной 	более одной 
Надежность системы	относительно низкая	высокая	высокая
Возможность масштабирования	относительно низкая	высокая	высокая
Организация обмена информацией	вдали от пользователя	на уровне пользователя	на уровне пользователя

По принципу построения можно выделить централизованные, децентрализованные и распределенные СУ. Централизованные наиболее просты по технической реализации, но при увеличении числа объектов РГ снижаются их надежность и скорость принятия решений. Реализация децентрализованных и распределенных СУ сложнее, но обеспечивает высокую надежность работы при большом количестве объектов РГ. Сравнительный анализ СУ показал

преимущество распределенных СУ [13], отличающихся возможностью взаимодействия каждого объекта с каждым.

Для управления ВиЭС предлагается использовать распределенную СУ на основе мультиагентного взаимодействия объектов генерации и нагрузки.

**Принцип мультиагентного управления с учетом экологичности РГ.**

Мультиагентная СУ (МАСУ) представляет собой совокупность интеллектуальных агентов, взаимодействующих между собой с целью достижения своих приоритетов при обеспечении эффективности системы в целом. Мультиагентный подход рассмотрен на примере ВиЭС, объединяющей десять децентрализованных систем электроснабжения (ДЭС) с источниками РГ (рис. 1).

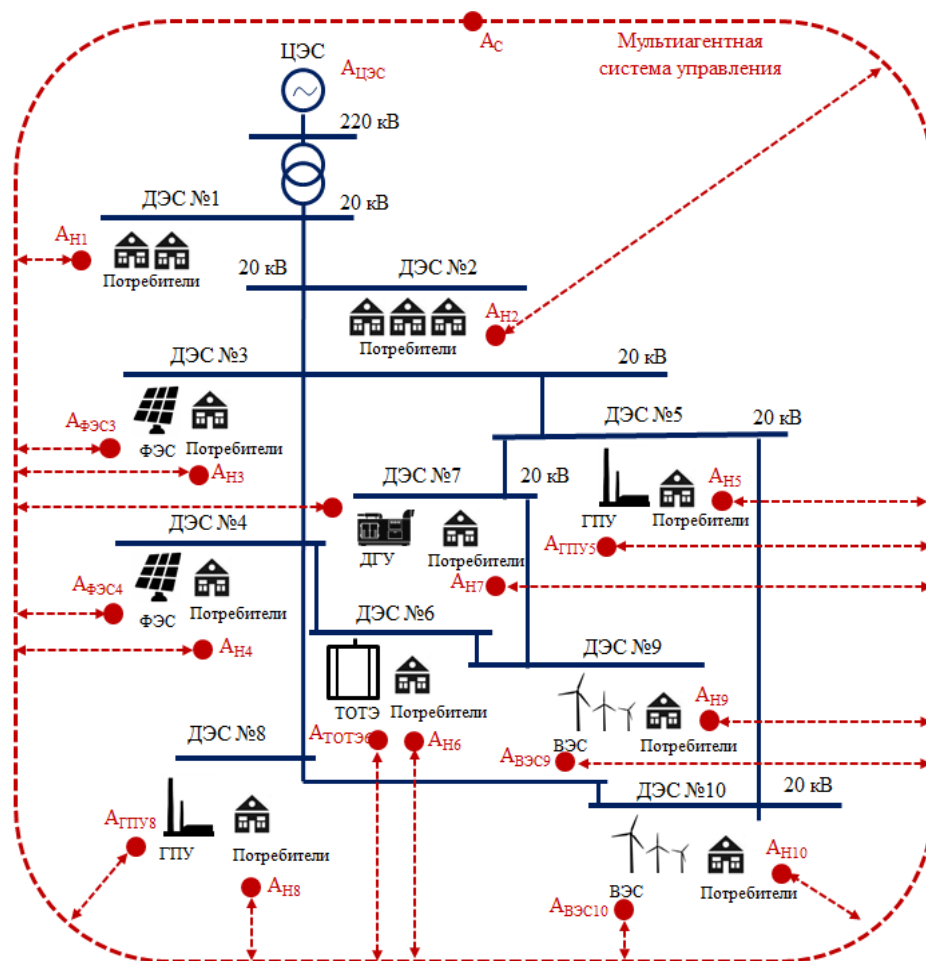


Рис. 1. Структурная схема ВиЭС с мультиагентной системой управления: ЦЭС – централизованная электрическая сеть; ДЭС – децентрализованная система электроснабжения; ФЭС – фотоэлектрическая электростанция; ВЭС – ветровая электростанция; ГПУ – газопоршневая установка; ДГУ – дизель-генераторная установка; ТОТЭ – твердооксидные топливные элементы; АН1– АН10 – агенты нагрузки; АФЭС, АГПУ, АВЭС, АДГУ, АТОТЭ – агенты генерации

ВиЭС имеет связь с централизованной электрической сетью (ЦЭС). Агентами мультиагентной СУ являются: системный агент  $A_C$ , агент нагрузки  $A_N$  и агенты генерации  $A_{РГ}$ . Агенты генерации разделены на три группы:

- агенты электростанций, генерация которых не регулируется ( $A_{ФЭС}$ ,  $A_{ВЭУ}$ ,  $A_{ТотЭ}$ );
- агенты электростанций, генерация которых может регулироваться ( $A_{ГПУ}$ ,  $A_{ДГУ}$ );
- агент ЦЭС ( $A_{ЦЭС}$ ) – может выступать как агент генерации, так и как агент потребления ЭЭ, (ЦЭС может как отдавать ЭЭ в сеть ВиЭС, так и получать излишки ЭЭ от ВиЭС).

МАСУ ориентирована на достижение эффективности для каждой ДЭС при соблюдении баланса мощности в ВиЭС в целом.

В общем случае баланс активной мощности выражается как

$$\sum P_{РГ} \pm \sum P_{ЦЭС} = \sum P_N + \sum \Delta P_{ВиЭС} + \sum P_{СН}, \quad (1)$$

где  $\sum \Delta P_{ВиЭС}$  – потери активной мощности в электрической сети ВиЭС;  $\sum P_{СН}$  – мощность собственных нужд электростанций.

В основу МАСУ положено два основных критерия: 1) экологичность ЭУ; 2) стоимость ЭЭ. Каждому агенту присваивается рейтинг экологичности  $R$  от 5 до 1 (чем экологичнее установка РГ, тем значение  $R$  ниже). Критерий 1 обеспечивает преимущество потребления ЭЭ от ВИЭ:

$$A_N \rightarrow A_{РГ_i} (R \rightarrow \min). \quad (2)$$

Значение  $R$  рассчитывается на основе методики оценки экологичности ЭУ с учетом их жизненного цикла [5], включающей пять этапов: 1) выбор ЭУ; 2) составление схемы жизненного цикла ЭУ; 3) оценка воздействия ЭУ на окружающую среду на этапах жизненного цикла; 4) присвоение баллов каждой ЭУ; 5) определение  $R$  ЭУ. Агенты генерации устанавливают стоимость  $C$  ЭЭ, а агенты нагрузки могут выбрать предложение с наименьшей стоимостью (при равенстве  $R$  (2)):

$$A_N \rightarrow A_{РГ_i} (C \rightarrow \min). \quad (3)$$

Разработаны алгоритмы функционирования агентов генерации и нагрузки. На рис. 2 показан алгоритм работы агента нагрузки  $A_N$ . При необходимости получения ЭЭ от соседних источников РГ  $A_N$  направляет запрос  $A_C$  для внесения его в список активных агентов. Далее  $A_N$  запрашивает у  $A_C$  список активных  $A_{РГ}$  и направляет запрос  $A_{РГ}$  ближайших установок. Выполняется поиск  $A_{РГ}$ , которые удовлетворяют требованиям (2) и (3). По результатам поиска между  $A_N$  и выбранными  $A_{РГ}$  заключаются соглашения о передаче ЭЭ. На основе взаимодействия  $A_{РГ}$ ,  $A_N$  и  $A_{ЦЭС}$  осуществляется распределение электрической нагрузки между ДЭС.

#### **Исследование эффективности выбора ЭУ с учетом экологичности.**

С использованием программного комплекса (ПК) *JADE* для ВиЭС (рис. 1) были сформированы агенты  $A_C$ ,  $A_{ЦЭС}$ ,  $A_N$ ,  $A_{РГ}$  и проведено исследование их взаимодействия. Для каждого агента разработано поле ввода данных. Данными для  $A_{РГ}$  являются: рейтинг экологичности, объем и стоимость продаваемой ЭЭ. Данными для  $A_N$ : минимальный запрашиваемый рейтинг экологичности  $R_{\text{MIN}}$ , максимальная стоимость ЭЭ  $C_{\text{MAX}}$ , максимальный бюджет для покупки ЭЭ  $B_{\text{MAX}}$ .

Моделирование взаимодействия агентов в *JADE* позволяет определить мощность генерации маневренных ЭУ (ГПУ, ДГУ) и электрическую мощность, которую ВиЭС необходимо получить от ЦЭС (или выдать в сеть). Это является входными данными при моделировании в ПК *RastrWin* установившегося режима работы электрической сети ВиЭС. Имитационная модель электрической сети ВиЭС в *RastrWin* позволяет определить передаваемую мощность, уровни напряжения у потребителей, рассчитать количество производимой и потребляемой ЭЭ для каждой ДЭС.

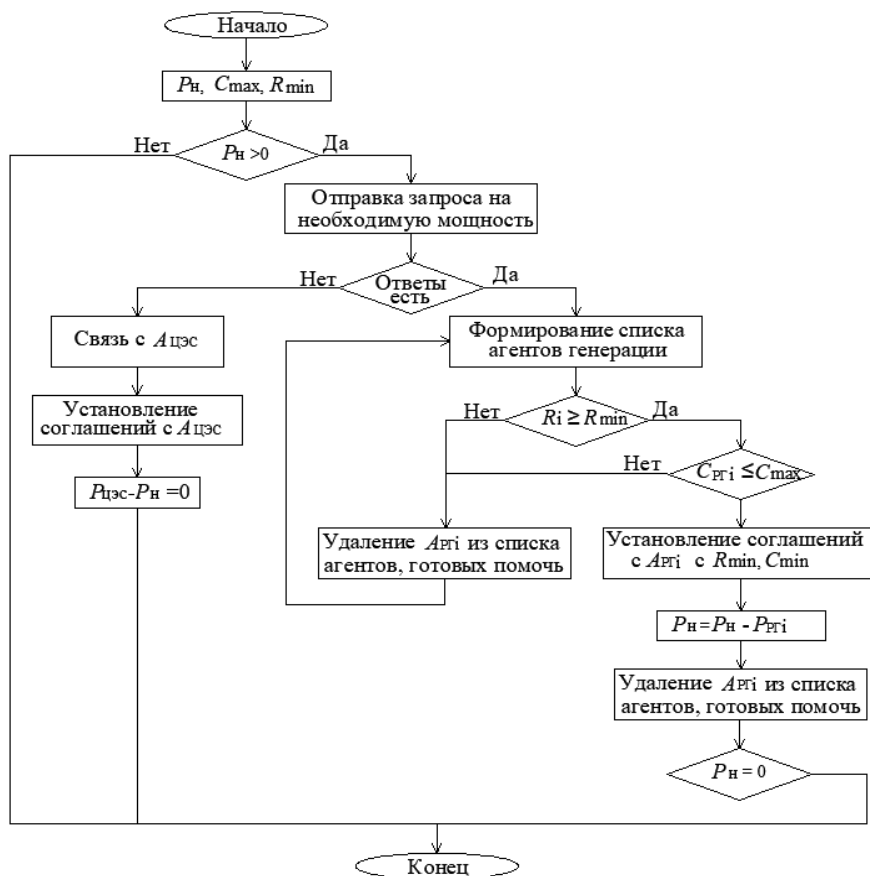


Рис. 2. Алгоритм функционирования агента нагрузки  $A_n$ :

$P_n$  – мощность нагрузки;  $C_{max}$  – наибольшая возможная стоимость ЭЭ для покупки;  
 $R_{min}$  – наименьший допустимый рейтинг экологичности источника РГ;  
 $C_{рг}$  – стоимость ЭЭ от источника РГ;  $P_{рг}$  – приобретаемая от источника РГ мощность;  
 $P_{цэс}$  – приобретаемая от ЦЭС мощность

С помощью ПК *JADE* и *RastrWin* выполнено моделирование функционирования ВиЭС (рис. 1) в течение суток ( $T = 24$  ч) для двух вариантов: 1) возможность обмена ЭЭ только между отдельными ДЭС и ЦЭС; 2) возможность обмена ЭЭ между ДЭС на основе МАСУ с учетом рейтинга экологичности ЭУ РГ.

При моделировании расчетный период был разделен на шесть интервалов по 4 ч. На каждом интервале значения мощности генерации и нагрузки были приняты постоянными. Исходные данные по производству ЭЭ ЭУ РГ и нагрузка потребителей были заданы суточными графиками генерации и нагрузки. Пример графиков для ДЭС № 4 приведен на рис. 3 и 4.

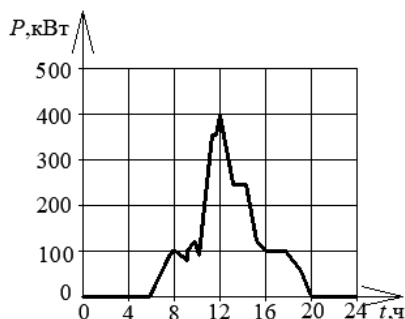


Рис. 3. График генерации для ДЭС № 4

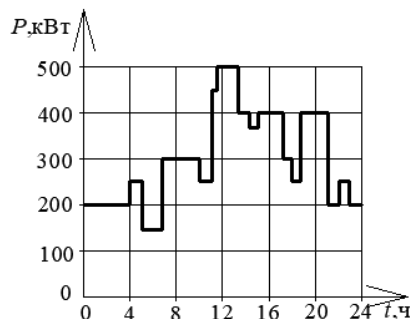


Рис. 4. График нагрузки для ДЭС № 4

На основе методики оценки экологичности ЭУ с учетом жизненного цикла [5] определен рейтинг экологичности  $R$  для следующих ЭУ РГ: ДГУ  $P_{\text{уст}} = 100$  кВт; ВЭС суммарной  $P_{\text{уст}} = 90$  кВт (из трех ветрогенераторов «Муссон» с  $P_{\text{уст}} = 30$  кВт); ФЭС суммарной  $P_{\text{уст}} = 100$  кВт (состоящая из 400 солнечных модулей единичной мощностью 0,25 кВт); газопоршневая установка  $P_{\text{уст}} = 103$  кВт; ЭУ на ТОТЭ  $P_{\text{уст}} = 100$  кВт, работающая на биогазе.

Для каждой ЭУ РГ была составлена схема жизненного цикла, проведена оценка воздействия на окружающую среду, по результатам которой каждой ЭУ присвоены баллы. По каждому типу ЭУ просуммированы полученные баллы и определен рейтинг экологичности. Высший рейтинг экологичности получили электростанции на ВИЭ и ТОТЭ, низший – ДГУ. Основные параметры агентов генерации приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры агентов генерации

Агент	$U_{\text{ном}}$ , кВ	$P_{\text{рег}}$ , кВт	$R$ , отн. ед.	$C$ , руб./кВт·ч
Арг3(ФЭС)	20	–	1	9,75
Арг4(ФЭС)	20	–	1	9,00
Арг5(ГПУ)	20	1500	2	7,50
Арг6(ТОТЭ)	20	–	1	9,75
Арг7(ДГУ)	20	600	3	10,00
Арг8(ГПУ)	20	500	2	7,50
Арг9(ВЭС)	20	–	1	10,00
Арг10(ВЭС)	20	–	1	6,75

Под  $P_{\text{рег}}$  понимается заданный диапазон регулирования мощности ЭУ. В ПК *JADE* выполнено моделирование взаимодействия агентов. Для каждого интервала времени в течение расчетного периода были определены установленные соглашения между агентами. В табл. 3 показан пример для ДЭС № 6.

Таблица 3

Установленные соглашения для ДЭС № 6

Интервал времени, ч	Соглашения между агентами	P, кВт	C, руб./кВт·ч
0–4	Арг6(ТОТЭ) → Арг3	100	9,75
4–8	–	–	–
8–12	Ан6 ← Арг8(ГПУ)	100	7,50
12–16	Ан6 ← Арг8(ГПУ)	200	7,50
16–20	Арг6(ТОТЭ) → Ан5	100	9,75
20–24	–	–	–

Из табл. 3 видно, что учет экологичности установок РГ при управлении энергообменом в ВиЭС позволил продать излишки генерации ТОТЭ в период минимальной собственной нагрузки ДЭС № 6 (несмотря на более высокую стоимость по сравнению с аналогичным показателем других менее экологичных ЭУ).

Для оценки эффективности предложенного метода управления энергообменом в ВиЭС проведено сравнение значений потери активной мощности в электрической сети ВиЭС и коэффициента *K*, показывающего долю использования электроэнергии в ВиЭС от экологичных источников РГ. Исследование проведено при возможности обмена ЭЭ только между отдельными ДЭС и ЦЭС (вариант 1) и при возможности обмена ЭЭ между ДЭС (вариант 2).

Коэффициент *K* определяется по формуле

$$K = \Sigma[W_{ФЭС} + W_{ВЭС} + W_{ТОТЭ}] / \Sigma W_{ВиЭС}, \tag{4}$$

где *W*<sub>ФЭС</sub>, *W*<sub>ВЭС</sub>, *W*<sub>ТОТЭ</sub> – ЭЭ, произведенная ФЭС, ВЭС и ТОТЭ за расчетный период времени *T*; *W*<sub>ВиЭС</sub> – ЭЭ, потребленная нагрузкой ВиЭС за расчетный период времени.

Полученные результаты для двух вариантов функционирования ВиЭС приведены в табл. 4.

Таблица 4

Показатели эффективности функционирования ВиЭС

Интервал времени, ч	K, %		ΔP, кВт	
	вариант 1	вариант 2	вариант 1	вариант 2
0–4	31,2	37,6	5,312	3,631
4–8			8,174	3,219
8–12			8,629	8,674
12–16			4,164	4,164
16–20			19,105	2,972
20–24			16,907	2,637

Проведенные исследования показали, что учет экологичности ЭУ РГ при управлении (рис. 1) на основе МАСУ позволил:

- увеличить долю использования ЭЭ от экологичных ЭУ на основе ВИЭ и ТОТЭ в общем потреблении ВиЭС с 31,2 до 37,6%;
- снизить общие потери активной мощности в электрической сети 20 кВ почти на 60% (за счет использования ЭЭ от источников, находящихся ближе к месту ее потребления).

**Заключение.** Расширение использования экологичных источников РГ является важной задачей современной электроэнергетики. На примере ВиЭС, объединяющей РГ на ВИЭ (фотоэлектрическая электростанция, ветровая электростанция, энергоустановка на твердооксидных топливных элементах), РГ на органическом топливе (газопоршневая установка, дизель-генераторная установка) и централизованную электрическую сеть, проведено исследование эффективности учета экологичности энергоустановок при мультиагентном управлении энергообменом. Показано, что предложенный мультиагентный подход к управлению ВиЭС позволяет повысить долю использования ВИЭ и минимизировать потери активной мощности в электрической сети ВиЭС.

Предложенный подход может быть использован для управления энергообменом как на напряжении 0,4 кВ, если ЭУ внутри одной ДЭС принадлежат различным собственникам, так и на среднем напряжении 10(20) кВ между объединенными в ВиЭС децентрализованными системами электроснабжения.

#### Литература

1. *Барахтенко Е.А., Воронай Н.И., Соколов Д.В.* Современное состояние исследований в области управления интегрированными энергетическими системами // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2021. № 4. С. 4–23.
2. *Воронай Н.И.* От плана ГОЭЛРО к глобальному электроэнергетическому интернету // Электричество. 2020. № 12. С. 9–13.
3. *Лоскутов А. Б.* Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 1. С. 9–27.
4. *Максимов А.* Ввод новых электростанций на базе ВИЭ в рамках программы поддержки до 2035 года может вырасти до 8 ГВт [Электронный ресурс] // Минэнерго России: офиц. сайт. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/21596> (дата обращения: 22.11.2021).
5. *Маслеева О.В., Эрдили Н.И., Борисов С.Е.* Оценка материального потока жизненного цикла возобновляемых источников энергии // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. ст. науч.-техн. конф. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Н. Новгород, 2020. С. 303–309.
6. О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам функционирования активных энергетических комплексов: постановление Правительства РФ № 320 от 21.03.2020 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/regulations/reg320-210320.pdf>.
7. *Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Кечкин А.Ю.* Оптимизация электротехнического комплекса виртуальной электростанции с источниками распределенной генерации // Фёдоровские чтения – 2017: материалы междунар. научно-практической конференции МЭИ. М.: Изд. дом МЭИ, 2017. С. 312–320.
8. Технические требования к генерирующему оборудованию участников оптового рынка М.: АО «Системный оператор единой энергетической системы», 2021.
9. *Фортос В.Е., Макаров А.А.* Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью. М.: ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», 2012. 235 с.
10. *Chang W., Dong W., Zhao L., Yang Q.* Model Predictive Control based Energy Collaborative Optimization Management for Energy Storage System of Virtual Power Plant. In: Proc. 19<sup>th</sup> International Symposium on Distributed Computing and Applications for Business Engineering and Science (DCABES), 2020, pp. 112–115. DOI: 10.1109/DCABES50732.2020.00037.
11. *Hanan M., Yousaf W., Ai X., Asghar E., Javed M. Y., Salman S.* Multi-operating Modes Based Energy Management Strategy of Virtual Power Plant. In: Proc. 2<sup>nd</sup> IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1109/EI2.2018.8582406.
12. *Kasaei M.J., Gandomkar M., Nikoukar J.* Optimal management of renewable energy sources by virtual power plant. *Renewable Energy*, 2017, vol. 114, pp. 1180–1188.



13. Meliani M., Barkany A. el, Abbassi I. el, Darcherif A.M., Mahmoudi M. Control system in the smart grid: State of the art and opportunities. In: Proc. IEEE 13<sup>th</sup> International Colloquium of Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA), 2020. DOI: 10.1109/LOGISTIQUA49782.20-20.9353878.

14. Yu J., Jiao Y., Ni M., Yu W. VPP frequency response feature based on distributed control strategy. In: Proc. China International Conference on Electricity Distribution (CICED), 2016, pp. 1–5. DOI: 10.1109/CICED.2016.7576386.

15. Zamani A.G., Zakariazadeh A., Jadid S., Kazemi A., Stochastic operational scheduling of distributed energy resources in a large scale virtual power plant. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, vol. 82, pp. 608–620.

---

**СОСНИНА ЕЛЕНА НИКОЛАЕВНА** – доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики, электроснабжения и силовой электроники, Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева, Россия, Нижний Новгород (sosnyna@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6207-9103>).

**ШАЛУХО АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики, электроснабжения и силовой электроники, Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева, Россия, Нижний Новгород (shaluho.andrey@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8235-0658>).

**ЭРДИЛИ НАТАЛЬЯ ИГОРЕВНА** – ассистент кафедры электроэнергетики, электроснабжения и силовой электроники, Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева, Россия, Нижний Новгород (erdili.ni@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2994-5759>).

---

**Elena N. SOSNINA, Andrey V. SHALUKHO, Natalya I. ERDILI**  
**INCREASING THE EFFICIENCY OF RENEWABLE ENERGY SOURCES**  
**IN A VIRTUAL POWER PLANT BASED**  
**ON MULTI-AGENT CONTROL**

**Key words:** virtual power plant, distributed generation, renewable energy sources, energy exchange management, multi-agent approach.

The article is devoted to the problem of increasing the efficiency of renewable energy sources (RES). The development of distributed energy based on renewable energy sources is one of the most important areas for ensuring the energy security of consumers and reducing the anthropogenic load on the environment. Combining distributed sources of electricity into virtual power plants (VPP) with a general control system makes it possible to use the potential of renewable energy sources more efficiently. An approach to the management of energy exchange in a virtual power plant (VPP) based on a multi-agent system (MAS) is proposed and substantiated, taking into account the criterion of environmental friendliness of distributed generation (DG) installations and ensuring the efficient use of environmentally friendly renewable energy sources. Algorithms for the operation of generation and load agents have been developed to control energy exchange in a virtual power plant based on a multi-agent system. The algorithms differ in taking into account the environmental friendliness rating of distributed generation installations and allow you to maximize the renewable energy sources potential, ensuring the balance of electrical power in the virtual power plant and minimal losses during its transmission. A 20 kV virtual power plant is considered, combining 10 decentralized power supply systems (DPSS) with sources of distributed generation of various types and having the ability to exchange electricity with a centralized power system (CES). With the help of software complexes JADE and "RastrWin", a study of the effectiveness of the method for controlling energy exchange in

virtual power plant based on multi-agent system was carried out, taking into account the environmental rating of distributed generation installations. The results of the research showed that the use of a multi-agent approach to control the virtual power plant made it possible to increase the share of the use of renewable energy sources and reduce power losses in the electrical network.

#### References

1. Barakhtenko E.A., Voropai N.I., Sokolov D.V. *Sovremennoe sostoyanie issledovaniy v oblasti upravleniya integrirovannymi energeticheskimi sistemami* [Current state of research in the management field of integrated energy systems]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika*, 2021, no. 4, pp. 4–23.
2. Voropai N.I. *Ot plana GOELRO k global'nomu elektroenergeticheskomu internet* [From the GOELRO plan to the global electricity Internet]. *Elektrichestvo*, 2020, no. 12, pp. 9–13.
3. Loskutov A. B. *Problemy perekhoda elektroenergetiki na tsifrovye tekhnologii* [Problems of electric power industry transition to digital technologies]. *Intellektual'naya elektrotekhnika* [Smart electrical engineering], 2018, no.1, pp. 9–27.
4. Maksimov A. *Vvod novykh elektrostantsii na baze VIE v ramkakh programmy podderzhki do 2035 goda mozhет vyrasti do 8 GVT* [Commissioning of new power plants based on RES under the support program until 2035 can grow to 8 GW]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/21596> (Accessed Date 2021, Nov. 22).
5. Masleeva O.V., Erdili N.I., Borisov S.E. *Otsenka material'nogo potoka zhiznennogo tsikla vozobnovlyaemykh istochnikov energii* [Life cycle assessment of renewable energy sources material flow]. In: *Aktual'nye problemy elektroenergetiki: sb. st. nauch. tekhn. konf.* [Actual problems of the electric power industry]. Nizhny Novgorod, 2020, pp. 303–309.
6. *Postanovlenie Pravitel'stva RF № 320 ot 21.03.2020 O vnesenii izmenenii v nekotorye akty Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii po voprosam funktsionirovaniya aktivnykh energeticheskikh kompleksov* [About making changes to some acts of the Russian Federation Government of the active energy complexes functioning issues]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202003240012> (Accessed Date 2021, Nov. 20).
7. Sosnina E.N., Shalukho A.V., Kechkin A.Yu. *Optimizatsiya elektrotekhnicheskogo kompleksa virtual'noi elektrostantsii s istochnikami raspredelennoi generatsii* [Optimization of the electrical complex of a virtual power plant with distributed generation sources]. In: *Fedorovskie chteniya – 2017: materialy mezhdunar. nauchno-prakticheskoi konferentsii MEI* [Proc. of Int. Sci. Conf. «Fedorov readings – 2017»]. Moscow, 2017, pp. 312–320.
8. *Tekhnicheskie trebovaniya k generiruyushchemu oborudovaniyu uchastnikov optovogo rynka* [Technical requirements for generating equipment of wholesale market participants]. Available at: [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/2019/tq\\_010119.pdf](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/2019/tq_010119.pdf) (Accessed Date 2021, Nov. 20).
9. Fortov V.E., Makarov A.A. *Kontseptsiya intellektual'noi elektroenergeticheskoi sistemy Rossii s aktivno-adaptivnoi set'yu* [The concept of an intelligent electric power system in Russia with an active-adaptive grid]. Moscow, 2012, 235 p.
10. Chang W., Dong W., Zhao L., Yang Q. *Model Predictive Control based Energy Collaborative Optimization Management for Energy Storage System of Virtual Power Plant*, in *Proc.2020 19th International Symposium on Distributed Computing and Applications for Business Engineering and Science (DCABES)*. pp. 112–115. doi: 10.1109/DCABES50732.2020.00037.
11. Hanan M., Yousaf W., Ai X., Asghar E., Javed M. Y., Salman S. *Multi-operating Modes Based Energy Management Strategy of Virtual Power Plant*, in *Proc.2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/EI2.2018.8582406.
12. Kasaei M. J., Gandomkar M., Nikoukar J. *Optimal management of renewable energy sources by virtual power plant*, *Renewable Energy*, vol. 114, pp. 1180–1188, 2017.
13. Meliani M., Barkany A. el, Abbassi I. el, Darcherif A.M., Mahmoudi M. *Control system in the smart grid: State of the art and opportunities*, in *Proc.2020 IEEE 13th International Colloquium of Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA)*, 2020. doi: 10.1109/LOGISTIQUA49782.-2020.9353878.

14. Yu J., Jiao Y., Ni M., Yu W. *VPP frequency response feature based on distributed control strategy*, in Proc.2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). 2016, pp. 1–5. doi: 10.1109/CICED.2016.7576386.

15. Zamani A.G., Zakariazadeh A., Jadid S., Kazemi A., *Stochastic operational scheduling of distributed energy resources in a large scale virtual power plant*, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 82, pp. 608–620, 2016.

---

**ELENA N. SOSNINA** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Electric Power Engineering, Power Supply and Power Electronics Department, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Russia, Nizhny Novgorod (sosnyna@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6207-9103>).

**ANDREY V. SHALUKHO** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Electric Power Engineering, Power Supply and Power Electronics Department, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Russia, Nizhny Novgorod (shaluho.andrey@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8235-0658>).

**NATALYA I. ERDILI** – Assistant Lecturer, Electric Power Engineering, Power Supply and Power Electronics Department, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Russia, Nizhny Novgorod (erdili.ni@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2994-5759>).

---

**Формат цитирования:** *Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Эрдил И.И.* Повышение эффективности использования возобновляемых источников энергии в составе виртуальной электростанции на основе мультиагентного управления // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 3. – С. 103–113. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-3-103-113.