

## **Применение алгоритмов роевого интеллекта в управлении генерирующим потребителем с возобновляемыми источниками энергии\***

**В.З. МАНУСОВ<sup>а</sup>, П.В. МАТРЕНИН<sup>б</sup>, Н. ХАСАНЗОДА<sup>с</sup>**

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

<sup>а</sup> [manusov36@mail.ru](mailto:manusov36@mail.ru)   <sup>б</sup> [pavel.matrenin@gmail.com](mailto:pavel.matrenin@gmail.com)   <sup>с</sup> [nasrullo-5445@mail.ru](mailto:nasrullo-5445@mail.ru)

В работе рассмотрена задача оптимального управления генерирующим потребителем с возобновляемыми источниками энергии в интеллектуальной сети с распределенной генерацией и двусторонними потоками энергии. Показано, что управление необходимо выполнять в недетерминированных условиях из-за невозможности точного прогнозирования выработки электроэнергии возобновляемыми источниками. Для управления генерирующим потребителем использована модель выбора управляющих действий на основе логических правил, что приводит к необходимости решения задачи структурно-параметрической оптимизации списка правил и значений их численных параметров. В отличие от существующих исследований, рассмотрена задача оптимального управления с точки зрения отдельного генерирующего потребителя, а не всей распределенной системы, а также управление без использования в явном виде прогнозов выработки и потребления. Решение данной задачи оптимизации выполнено тремя алгоритмами роевого интеллекта (алгоритм роя частиц, алгоритм пчел, алгоритм светлячков) и алгоритмом градиентного спуска. Вычислительные эксперименты проведены для моделей ветроэнергетических систем на дальневосточных островах Русский и Попова. Полученные результаты показали высокую эффективность роевых алгоритмов, которые продемонстрировали надежную и быструю сходимость к глобальному экстремуму задачи оптимизации при различных вариантах взаимодействия и различных параметрах генерирующих потребителей. Также проведен анализ влияния емкости аккумуляторных батарей генерирующего потребителя на вариативность его действий и в конечном счете на повышение выгоды от взаимобмена электроэнергии с внешней электроэнергетической системой и соседними генерирующими потребителями. Дано обоснование экономической выгоды от повышения емкости накопителей энергии до определенного предела, который может быть определен предложенным в работе способом.

**Ключевые слова:** генерирующий потребитель, роевой интеллект, структурно-параметрическая оптимизация, оптимальное управление, возобновляемая энергетика, интеллектуальные сети

---

\* Статья получена 28 февраля 2019 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий возобновляемой энергетики позволяет потребителям электроэнергии получать ее не только от внешней централизованной системы, но и от своих собственных источников, таких как ветроэнергетические установки (ВЭУ) и солнечные панели. Если у потребителя выгодные с точки зрения возобновляемых источников энергии климатические условия и имеется возможность по размещению достаточного числа ВЭУ или солнечных панелей, чтобы вырабатывать значительно больше собственных потребностей, то потребитель может не только получать электроэнергию от внешней системы, но и отдавать ей свои избытки. При этом возникает принципиально важный для реализации концепции Smart Grid двусторонний поток энергии и информации, а потребитель в этом случае может быть назван «генерирующим потребителем» (ГП) [1]. Так как стоимость электроэнергии для потребителя не является неизменной величиной, возникает задача оптимального управления ГП. Суть задачи – регулировать потоки электроэнергии, то есть определять, в какой момент времени продавать энергию внешней системе, в какой – покупать, когда и какое количество энергии запасать в аккумуляторах или, наоборот, брать ранее накопленную энергию.

Генерирующий потребитель функционирует в условиях стохастического изменения выработки электроэнергии возобновляемыми источниками и в меньшей степени – собственного потребления. Кроме того, задача управления имеет высокую размерность пространства поиска решений, а целевая функция не является аналитическим выражением, а рассчитывается алгоритмически. Поэтому задача требует применения методов, позволяющих решать подобные сложные задачи оптимизации. К таким методам относятся метаэвристические стохастические методы.

Оптимальному управлению в сетях Smart Grid с распределенной генерацией и возобновляемыми источниками энергии посвящено множество современных исследований, таких как [2–4]. Однако в них оптимальное управление осуществляется на уровне надсистемы, а не отдельных ГП. Такое управление позволяет учитывать данные обо всех участниках распределенной электроэнергетической системы, но возникает риск, связанный с централизацией управления. В работе [5], напротив, рассматривается оптимизационная задача управления изолированными электроэнергетическими системами без обмена с другими ГП или глобальной электроэнергетической системой страны. При этом в указанной работе особое внимание посвящено выбору накопителя электроэнергии.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

**Характеристика генерирующих потребителей.** Рассмотрены два крупных ГП: энергосистема острова Русский и энергосистема острова Попова. Данные о скорости ветра позволяют сделать прогноз, согласно которому возможно создание ветроэлектростанций (ВЭС) до 16 МВт на острове Русский и до 20 МВт на острове Попова [6]. Схема передачи электроэнергии в сеть электроснабжения островов Русский (ГП1) и Попова (ГП2) показана на рис. 1.

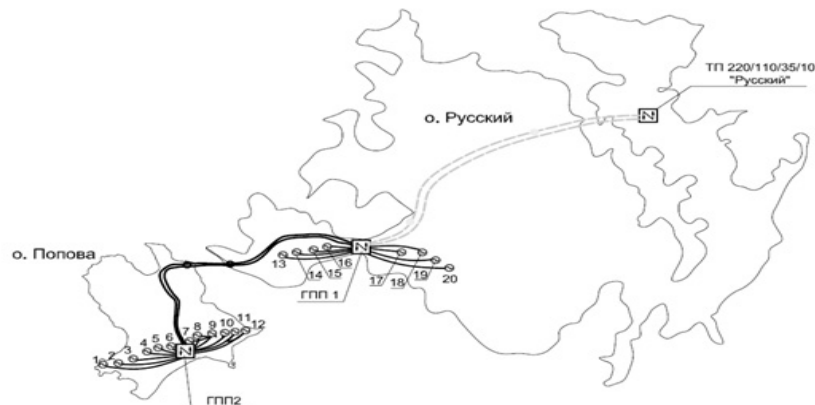


Рис. 1. Передача электроэнергии к распределительному устройству 35 кВ подстанции «Русская»

Fig. 1. Power transmission to the 35 kV switchgear of the Russkaya substation

По имеющимся данным о скорости ветра [6] можно дать оценку возможной мощности ГП, для этого была построена характеристика мощности ветроустановки типа WTU 2,05 МВт, показанная на рис. 2. Выше скорости 25 м/с ВЭУ отключается в целях безопасности.

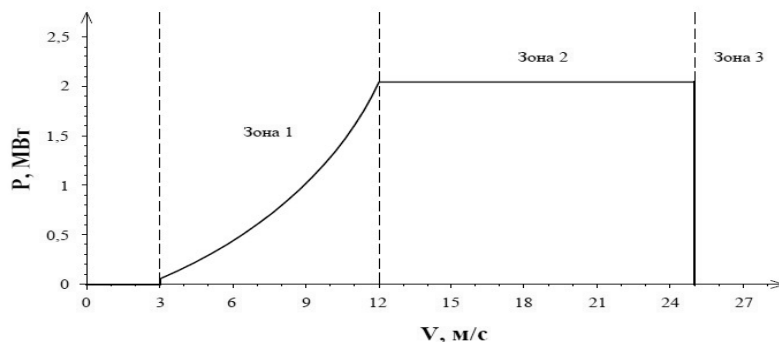


Рис. 2. Характеристика мощности ВЭУ WTU 2,05 МВт

Fig. 2. Power characteristic of the wind power plant WTU 2,05 MW

**Задача оптимального управления.** Задача оптимального управления заключается в создании управляющей системы, которая бы реализовывала последовательность воздействий на управляемый объект таким образом, чтобы достичь наилучшего возможного качества, заданного одним или несколькими критериями. Под управляемым объектом (объектом управления) понимается некоторая часть окружающего мира, на которую субъект управления может целенаправленно воздействовать [7] (рис. 3).

Подробное описание принципов оптимального управления можно найти в работах [7, 8]. Управление всегда происходит в течение некоторого периода времени, при этом управляемый объект переходит из одного состояния в другое. Состояние объекта управления характеризуется набором параметров, которые могут изменяться с течением времени:  $S(t) = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)\}$ . Таким образом, имеется вектор функций, каждая из которых показывает

изменение параметра объекта с течением времени. Эти функции в явном виде, как правило, неизвестны. Кроме того, имеется управляющая система, которая осуществляет управление. Управление может быть также задано как вектор функций  $A(t) = \{a_1(t), a_2(t), \dots, a_m(t)\}$ . Используются обозначения  $S$  от «state» и  $A$  от «action».



Рис. 3. Схема взаимодействия объекта, субъекта и среды

Fig. 3. The object, subject and environment interaction scheme

Для ГП параметрами состояния будут три величины ( $n = 3$ ):

- собственные потребности в электроэнергии в данный момент, МВт · ч ( $s_1$ );
- выработка электроэнергии, МВт · ч ( $s_2$ );
- запас энергии в аккумуляторе в данный момент, МВт · ч ( $s_3$ ).

Параметрами управления будут три другие величины ( $m = 3$ ):

- количество электроэнергии, которой в данный момент ГП обменивается с внешней системой (покупка или продажа), МВт · ч ( $a_1$ );
- количество электроэнергии, которой в данный момент ГП обменивается с соседним ГП (покупка или продажа), МВт · ч ( $a_2$ );
- количество электроэнергии, которую в данный момент ГП аккумулирует или расходует из аккумулятора, МВт · ч ( $a_3$ ).

Управление не влияет на параметры состояния, связанные с собственными потребностями ГП и выработкой ВЭУ, но непосредственно влияют на количество энергии в аккумуляторе. В данной задаче шаг времени положен равным одному часу. Так что за сутки имеется 24 значения по каждому из трех параметров состояния ГП и 24 значения по каждому из трех параметров управления. Пример приведен на рис. 4.

Задача оптимального управления в общем виде может быть записана следующим образом:

$$A^{opt}(t) = \operatorname{argmax}_{A(t) \in A_{\text{доп}}} \int_{t_0}^{t_T} f(t, S(t), A(t)) dt, \quad (1)$$

где  $A^{opt}(t)$  – искомое оптимальное управление, то есть указания, какие значения в какой момент времени должны принимать параметры управления (когда, сколько и кому продавать или покупать, запасать в аккумулятор или наоборот);  $A_{\text{доп}}$  – область допустимых значений параметров управления;  $f(t, S(t), A(t))$  – функция  $n + m + 1$  переменных, задающая некоторым образом

выгоду в зависимости от параметров объекта управления, от параметров управления, а также от состояния окружающей среды (например, для ГП это тариф на электроэнергию в текущее время суток);  $t_0$  и  $t_T$  – заданный диапазон времени, на котором рассматривается управление.

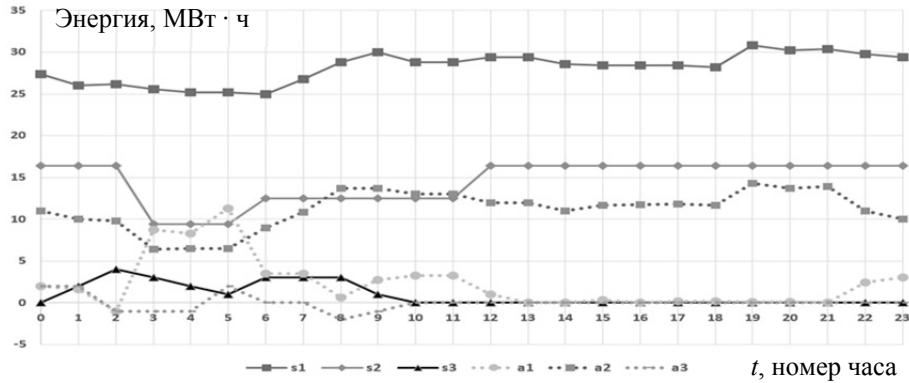


Рис. 4. Пример суточных графиков состояний и действий ГП

Fig. 4. A sample of daily charts of GC's states and actions

Из-за высокой сложности электроэнергетических систем в явном аналитическом виде функцию  $f(t, S(t), A(t))$  обычно получить нельзя, тем более ее интеграл. Но можно задать ее алгоритмически. В примере для ГП данная функция является кусочно-непрерывной, так как шаг времени равен одному часу. Задачу (1) можно записать без интеграла, в виде суммы, а функция  $f(t, S(t), A(t))$  является не чем иным, как разницей между доходами от продажи электроэнергии ГП и расходами на ее покупку, генерацию и аккумуляцию за один определенный час. Однако даже в этом случае аналитическое выражение для  $f(t, S(t), A(t))$  записать затруднительно, так как цена на электроэнергию является кусочно-постоянной функцией, обмен электроэнергией с соседним ГП зависит от его состояния и управления им. Таким образом, расчет значения  $f(t, S(t), A(t))$  необходимо выполнять алгоритмически.

## 2. МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

**Управление на основе правил.** Характерной чертой задачи (1) является допущение о принятии управленческого решения каждый час. При этом анализ показал, что все возможные управляющие действия можно описать, разделив их на четыре группы [9]. Далее использованы следующие обозначения:

- power\_wind – выработка ВЭУ за рассматриваемый час;
- power\_gc – потребление ГП за рассматриваемый час;
- dif – разность выработки ВЭУ и потребления ГП за рассматриваемый час;
- ассум – количество энергии, которое нужно добавить в аккумулятор ( $> 0$ ) или изъять из него ( $< 0$ ) за рассматриваемый час;
- pow\_ассум – энергия, запасенная в аккумуляторе по состоянию на рассматриваемый час;

- max\_accum – максимальное количество энергии, которое может быть запасено в аккумуляторе (константа, параметр ГП);
- max\_accum – максимальное количество энергии, которое может быть добавлено в аккумулятор за один час (константа, параметр ГП);
- sale\_accum – коэффициент, который регулирует баланс покупки и накопления (настраиваемый в процессе оптимизации параметр ГП);
- sale\_unload – коэффициент, который регулирует баланс продажи и использования накопленного (настраиваемый в процессе оптимизации параметр ГП);
- sale\_buy – количество энергии, которая продана внешней системе или соседнему ГП ( $> 0$ ) или куплена у них ( $< 0$ ) за рассматриваемый час.

Указанные 4 группы возможных управляющих действий [4]:

1. Накопить-продать (действие возможно только при избытке энергии).

- 1.1.  $dif = power\_wind - power\_gc$ ;
- 1.2.  $accum = \min(max\_accum - now\_accum, max\_accum\_h)$ ;
- 1.3.  $accum = accum * sale\_accum$ ;
- 1.4.  $now\_accum = now\_accum + accum$ ;
- 1.5.  $sale\_buy = dif - accum$ .

2. Накопить-купить:

- 2.1.  $dif = power\_wind - power\_gc$ ;
- 2.2.  $accum = \min(max\_accum - now\_accum, max\_accum\_hour)$ ;
- 2.3.  $accum = accum * buy\_accum$ ;
- 2.4.  $now\_accum = now\_accum + accum$ ;
- 2.5.  $sale\_buy = dif - accum$ .

3. Изъять-продать

- 3.1.  $dif = power\_wind - power\_gc$ ;
- 3.2.  $accum = now\_accum$ ;
- 3.3.  $accum = accum * sale\_unload$ ;
- 3.4.  $now\_accum = now\_accum - accum$ ;
- 3.5.  $sale\_buy = dif + accum$ .

4. Изъять-купить (действие возможно только при дефиците энергии):

- 4.1.  $dif = power\_wind - power\_gc$ ;
- 4.2.  $accum = \min(-dif, now\_accum)$ ;
- 4.3.  $accum = accum * buy\_unload$ ;
- 4.4.  $now\_accum = now\_accum - accum$ ;
- 4.5.  $sale\_buy = accum - dif$ .

Выбор действий должен зависеть от состояния ГП, но достаточно получить ответы на два вопроса. Первый, очевидно, связан с определением, находится ли ГП в состоянии избытка или дефицита энергии. Второй связан с тем, что цена на электроэнергию меняется в течение суток. Хотя возможны и различные схемы тарификации, в работе рассмотрен двузонный тариф, дневной тариф с 7 часов до 23 часов, а в остальные часы – ночной, более дешевый. Таким образом, нужно получить ответы на вопросы:

- без учета накопления покрывает ли выработка ВЭУ собственные потребности ГП ( $dif > 0$ )?
- действует ли сейчас особый период времени?

В управлении ГП учтена возможность использования двух интервалов, попадание в которые считается особым периодом ( $time1-time2$ ,  $time3-time4$ ),

значения границ интервалов являются настраиваемыми в процессе оптимизации параметрами.

В результате возникают четыре возможные предпосылки в условии:

- $(diff < 0)$  И НЕ (особый период времени);
- $(diff > 0)$  И НЕ (особый период времени);
- $(diff < 0)$  И (особый период времени);
- $(diff > 0)$  И (особый период времени).

Второе и третье действия могут быть выполнены при любом из данных четырех условий. Первое и четвертое действия – только в половине случаев, первое – когда  $diff > 0$  (избыток), четвертое – когда  $diff < 0$  (дефицит).

При создании управления ГП на основе правил получаем 12 правил вида

IF условие, THEN действие.

Количество правил равно 12, так как второе и третье действия могут быть выполнены при любом условии из четырех, а первое и четвертое – при двух условиях ( $2 \cdot 4 + 2 \cdot 2 = 12$ ). Кроме того, в модели управления ГП имеется четыре коэффициента баланса: `buy_unload`, `sale_unload`, `buy_accum`, `sale_accum` и четыре момента времени: `time1`, `time2`, `time3`, `time4`.

Для управления с использованием данных правил необходимо определить порядок их проверки, то есть приоритеты. Принятие решения начинается с проверки наиболее приоритетного правила. Если его условие выполнено, то реализуется соответствующее действие этого правила. Иначе проверяется следующее по приоритету правило, и так до конца списка правил. Условия составлены таким образом, что при проходе по списку правил обязательно будет найдено такое, условие которого выполнено.

В итоге для построения управления необходимо определить порядок правил с помощью задания приоритетов (`pri`) и настраиваемые параметры, указанные выше:

$Par = [pri_1, \dots, pri_{12}, buy\_unload, sale\_unload, buy\_accum, sale\_accum, time_1, \dots, time_4]$

Очень важна также емкость накопителя электроэнергии. Но поскольку в процессе функционирования ГП она не меняется, этот параметр вынесен за пределы задачи оптимального управления. Для исследования его влияния все расчеты проведены для нескольких значений емкости.

**Алгоритмы роевого интеллекта.** Алгоритмы роевого интеллекта являются одним из наиболее эффективных способов решения сложных задач оптимизации [10, 11]. Под сложными здесь понимаются нелинейные, недифференцируемые задачи высокой размерности со сложной топологией пространства поиска решения, со стохастическими и динамическими свойствами.

Как показано в многочисленных исследованиях, обзор которых дан в работе [11], заранее далеко не всегда невозможно определить наиболее подходящий для конкретной задачи алгоритм роевого интеллекта. Поэтому использование только одного алгоритма в задаче, где оптимальное решение неизвестно, может дать решение, эффективность которого невысока с точки зрения критерия оптимальности. При этом исследователь не может определить эффективность, не применив для сравнения другие алгоритмы. Поэтому в данном исследовании использованы три алгоритма роевого интеллекта: алгоритм роя частиц (Particle Swarm Optimization), алгоритм светлячков (Firefly Optimization) и алгоритм пчел (Bee algorithm), который не следует путать с

алгоритмом колонии пчел (Artificial Bee Colony Optimization). Описания алгоритмов именно в том виде, в котором они использованы в настоящей работе, даны в [11].

Для применения роевых алгоритмов необходимо определить преобразование координаты частицы  $X$  в решение прикладной задачи. В данном случае решение задачи представляет собой управляющие действия  $A(t)$ , как показано в выражении (1). Поэтому необходимо координаты частицы  $X$  перевести в вектор  $Par$ , задающий приоритеты правил и значения параметров управления. Каждый элемент вектора  $X$  ограничен от 0 до 1 [11].

$$X = [x_1, \dots, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, \dots, x_{20}]$$

$$Par = [pr_1, \dots, pr_{12}, buy\_unload, sale\_unload, buy\_accum, sale\_accum, time_1, \dots, time_4].$$

Приоритеты являются вещественными числами от 0 до 1, так что  $pr_i = x_i$ ,  $i = 1, \dots, 12$ . Параметры  $buy\_unload$ ,  $sale\_unload$ ,  $buy\_accum$ ,  $sale\_accum$  тоже принимают значения от 0 до 1, поэтому переводятся аналогично. Наконец,  $time_1, \dots, time_4$  задают номер часа в сутках, поэтому достаточно умножить соответствующую координату на 23 и округлить результат в меньшую сторону (номер часа от 0 до 23). Значения свободных параметров роевых алгоритмов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

#### Значения параметров роевых алгоритмов

##### Parameter values of the swarm algorithms

Алгоритм	Число частиц	Число итераций	Параметры
Частиц	200	500	$\alpha_1 = 1,5, \alpha_2 = 1,5, \omega = 0,7, \beta = 0,5$
Пчел	200	500	$n^s = 60, n^b = 6, n^g = 1, c^b = 20, c^g = 20, rad = 0,01, rx = 0,05$
Светлячков	50	2000	$\alpha = 0,05, \beta = 1, \gamma = 0,5$

В метаэвристических алгоритмах оптимизации очень важен выбор свободных параметров (эвристических коэффициентов) алгоритмов. В настоящей работе отдельного исследования влияния эвристических коэффициентов не проводилось, были взяты несколько наборов значений, показавших высокую эффективность в предыдущих исследованиях авторов и полученных с помощью эволюционной адаптации роевых алгоритмов [11, 12].

Для алгоритма светлячков число частиц снижено в четыре раза, а число итераций повышено в четыре раза по сравнению с алгоритмами роя частиц и пчел. Это сделано, так как алгоритм светлячков требует на каждой итерации сравнения каждого светлячка с каждым, поэтому число операций на этапе перемещения частиц квадратично зависит от числа частиц. У двух других роевых алгоритмов эта зависимость линейная. Большую часть расчетов занимает вычисление целевой функции, требующее моделирования суточного цикла работы двух ГП. Тем не менее для выравнивания времени расчетов у алгоритма роя светлячков число частиц снижено. А чтобы число расчетов



целевой функции осталось одинаковым для всех роевых алгоритмов, число итераций алгоритма светлячков соответственно повышено.

Кроме роевых алгоритмов был применен более простой алгоритм градиентного спуска (gradient descent). Он был применен для сравнения, поскольку имеет принципиально иной принцип работы, чем метаэвристические роевые алгоритмы, хотя и для него существуют модификации со сложными эвристиками и их комбинациями [13], кроме того, имеет немного настроечных параметров по сравнению с роевыми алгоритмами. В работе использован градиентный алгоритм, который может быть записан рекуррентной формулой следующего вида:

$$X^{k+1} = X^k - \alpha \cdot \nabla f(X^k). \quad (2)$$

Алгоритм на каждом шаге  $k$  находит градиент целевой функции и на его основе делает шаг в направлении уменьшения целевой функции для задачи минимизации и увеличения для задачи максимизации. Величина шага зависит от величины градиента и коэффициента  $\alpha$ . В данной работе коэффициент  $\alpha$  равен  $5 \cdot 10^{-5}$ , а вектор  $X$ , как и для роевых алгоритмов, представляет собой вектор из 20 элементов от 0 до 1 и переводится в решение задачи точно так же, как и для роевых алгоритмов. Поскольку целевая функция не может быть продифференцирована, направление градиента определяется численным методом путем нахождения приращения целевой функции по каждому элементу вектора  $X$  отдельно (приращение значения  $x_i$  равно  $5 \cdot 10^{-5}$ ) и определением нормированной суммы полученных векторов.

### 3. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

**Исходные данные.** Вычислительные эксперименты проведены при одновременном рассмотрении ГП острова Русский и острова Попова. Так что при оптимизации строились одинаковые модели управления для обоих ГП. В табл. 2 показаны использованные в расчетах цены. Цена электроэнергии от ВЭУ учитывает затраты на строительство и обслуживание ВЭУ, аналогично и для накопителей. Также введено ограничение – аккумулировать за один час можно не более 2 МВт, табл. 3 содержит данные о выработке ВЭУ и собственных потребностях обоих ГП.

**Моделирование суточного цикла.** Методология применения рассмотренных алгоритмов роевого интеллекта показана на рис. 5. Для градиентного метода алгоритм подобный, только происходит вне цикла.

Процесс моделирования суточного цикла работы ГП происходит при расчете целевой функции. Он показан на рис. 6.

Рассмотрено три варианта функционирования ГП.

1. ГП может покупать электроэнергию у внешней системы, но не может продавать ей или обмениваться с соседним ГП (результаты в табл. 3).

2. ГП может покупать электроэнергию у внешней системы и может продавать ей, но не может обмениваться с соседним ГП (результаты в табл. 4).

3. ГП может покупать электроэнергию у внешней системы и может продавать ей, а также может обмениваться с соседним ГП (результаты в табл. 5).

Таблица 2

Table 2

**Используемые цены электроэнергии****Electricity prices used**

Величина, МВт · ч	Цена, тыс. руб.
Выработка ВЭУ	2
Извлечение из аккумулятора	0,2
Продажа внешней электроэнергетической системе по дневному тарифу	2,7
Продажа внешней электроэнергетической системе по ночному тарифу	0,9
Покупка внешней электроэнергетической системой по дневному тарифу	3,2
Покупка внешней электроэнергетической системой по ночному тарифу	1,4
Продажа соседнему ГП по дневному тарифу	3,
Продажа соседнему ГП по ночному тарифу	1,4
Покупка у соседнего ГП по дневному тарифу	3
Покупка у соседнего ГП по ночному тарифу	1,4

Таблица 3

Table 3

**Выработка ВЭУ и собственные потребности в электроэнергии ГП****The wind power plant generation and the GC's own electricity needs**

Номер часа	Выработка ВЭУ ГП <sub>1</sub> , МВт	Собственные потребности ГП <sub>1</sub> , МВт	Выработка ВЭУ ГП <sub>2</sub> , МВт	Собственные потребности ГП <sub>2</sub> , МВт
0	16	27,4	20,5	3,56
1	16,4	26	20,5	3,38
2	15	26,2	20,5	3,4
3	9,7	25,6	11,76	3,32
4	9,4	25,2	11,76	3,27
5	9,4	25,2	11,76	3,27
6	12,2	25	15,65	3,25
7	13,6	26,8	15,65	3,48
8	12,3	28,8	15,65	3,74
9	11,9	30	15,65	3,9
10	12,5	28,8	15,65	3,74
11	12,8	28,8	15,65	3,74
12	17,3	29,4	20,5	3,82
13	17,5	29,4	20,5	3,82
14	16,9	28,6	20,5	3,71
15	17,4	28,4	20,5	3,69
16	16,5	28,4	20,5	3,69
17	16,3	28,4	20,5	3,69
18	16,0	28,2	20,5	3,66
19	16,4	30,8	20,5	4,00
21	16,8	30,2	20,5	3,92
22	16,2	30,4	20,5	3,95
23	16,9	29,8	20,5	3,87

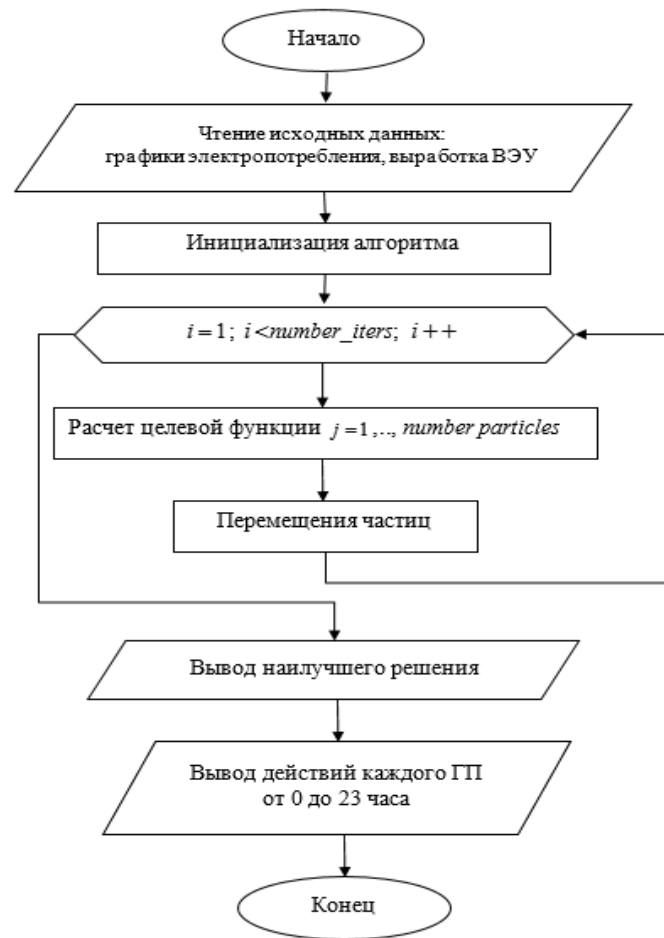


Рис. 5. Блок-схема алгоритма минимизации расходов ГП

Fig. 5. Block diagram of the algorithm of minimizing the costs of the GC

**Результаты.** В табл. 4–6 расходы ГП на электроэнергию за вычетом доходов от ее продажи показаны в миллионах рублей. Отрицательные значения означают, что ГП получил соответствующую прибыль, так как доход от продажи электроэнергии оказался выше расходов на ее выработку и накопление. Влияние энергии накопителей на снижение расходов ГП за счет оптимального управления показано на рис. 7–9 для трех указанных вариантов (слева ГП<sub>1</sub>, справа ГП<sub>2</sub>). При этом сплошная линия соответствует суммарным расходам обоих ГП при использовании роевых алгоритмов, пунктир с более длинными штрихами соответствует аналогичному показателю при использовании среднего результата градиентного спуска, с более короткими штрихами – при использовании наилучшего результата градиентного спуска. Под энергией накопителя понимается максимальное количество электроэнергии, которое может быть запасено в нем, так что расчеты потоков энергии можно проводить в одних единицах измерения.

**Анализ результатов.** Все алгоритмы запускались в каждом варианте по десять раз со случайными начальными условиями. При этом алгоритмы роевого интеллекта давали по каждому варианту одинаковое решение при каж-

дом запуске. Поэтому можно с высокой вероятностью считать, что они находили глобальные экстремумы для каждого варианта при каждом значении энергии накопителей. Градиентный спуск дал результаты незначительно хуже, но тем не менее ни в одном из запусков не позволил найти глобальный экстремум.

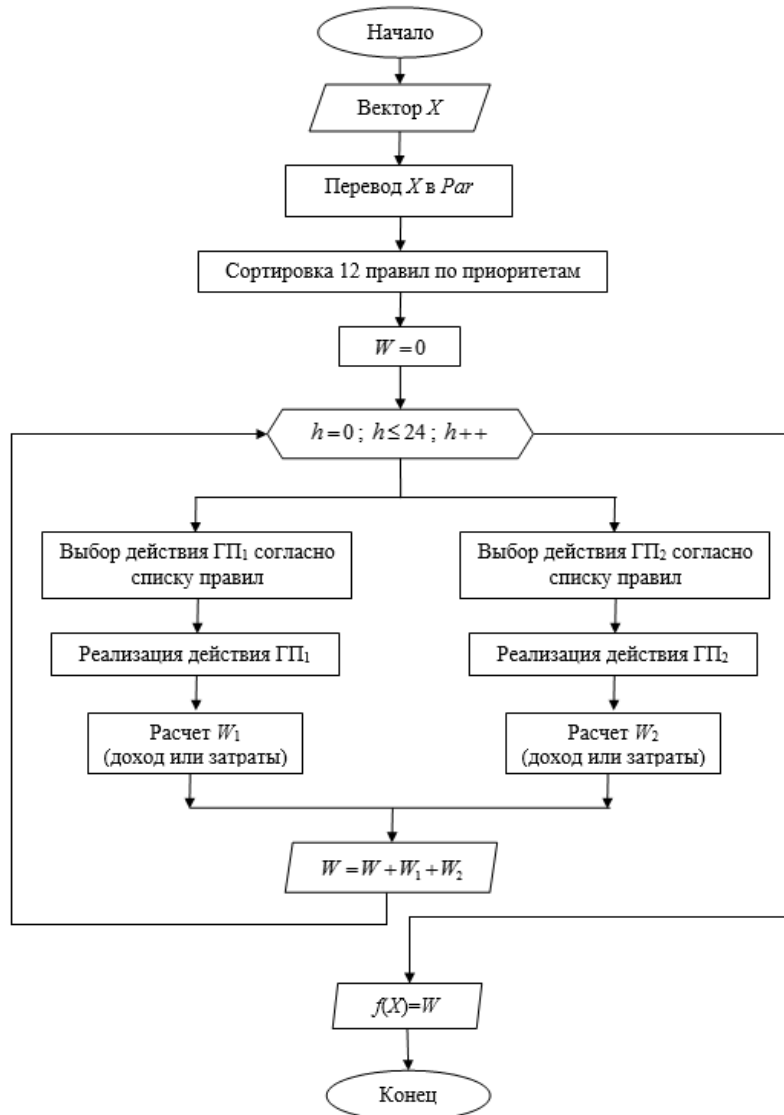


Рис. 6. Блок-схема алгоритма расчета целевой функции

Fig. 6. Block diagram of the algorithm for calculating the objective function

В данной задаче даже незначительное относительное отклонение результата от оптимального приводит к существенным потерям в абсолютном выражении. Кроме того, из рис. 7–9 видно, что при использовании даже лучших результатов градиентного спуска не удалось бы наглядно показать влияние максимальной энергии накопителей на итоговые расходы ГП. Для роевых

алгоритмов видно, что повышение максимальной энергии накопителей с каждым шагом в 2 МВт до величины 16 МВт снижает расходы ГП для каждого из вариантов. Исключение составляет лишь вариант, когда ГП<sub>2</sub> не может продавать избыток электроэнергии, но этот вариант наименее важен, так как принципиально важно иметь двусторонний поток электроэнергии.

Таблица 4

Table 4

**Результаты оптимизации без возможности продажи электроэнергии внешней системе и без обмена между ГП (вариант 1)**

**Optimization results without the possibility of selling electricity to the external system and without an exchange between the GSs (option 1)**

Энергия накопителя, МВт · ч	Рой частиц, рой пчел, рой светлячков		Градиент, среднее из 10		Градиент, лучшее из 10		Отклонение среднего градиента от оптимума, %	Отклонение лучшего градиента от оптимума, %
	ГП <sub>1</sub> , расход в сут-ки	ГП <sub>2</sub> , расход в сут-ки	ГП <sub>1</sub> , расход в сут-ки	ГП <sub>2</sub> , расход в сут-ки	ГП <sub>1</sub> , расход в сут-ки	ГП <sub>2</sub> , расход в сут-ки		
4,00	1,548	0,175	1,556	0,175	1,549	0,175	0,4	0,1
6,00	1,545	0,175	1,557	0,176	1,555	0,175	0,7	0,6
8,00	1,542	0,175	1,558	0,175	1,555	0,175	0,9	0,7
10,00	1,538	0,175	1,558	0,175	1,539	0,175	1,1	0,0
12,00	1,535	0,175	1,554	0,175	1,555	0,175	1,1	1,1
16,00	1,532	0,175	1,562	0,175	1,555	0,175	1,7	1,3
20,00	1,532	0,175	1,563	0,175	1,555	0,175	1,8	1,3
24,00	1,532	0,175	1,558	0,176	1,544	0,175	1,5	0,7

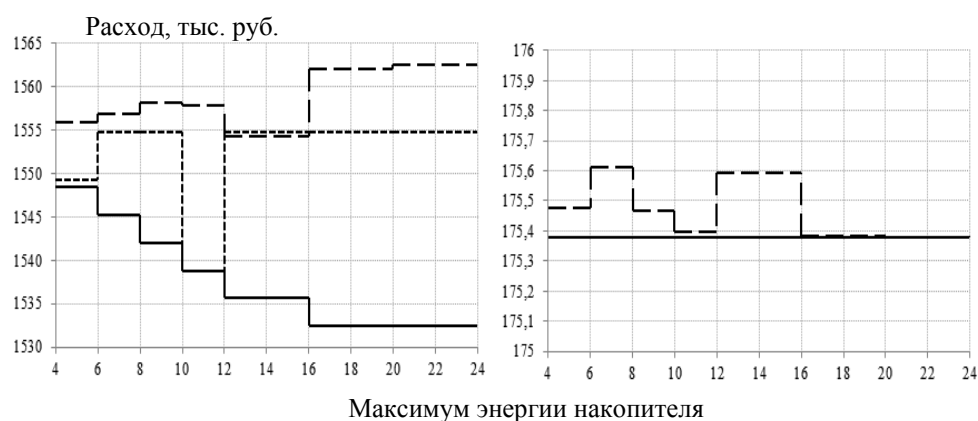


Рис. 7. Влияние максимальной энергии накопителей на снижение расходов ГП при оптимальном управлении (вариант 1)

Fig. 7. An effect of maximum battery energy on reducing the cost of GS with an optimal control (option 1)

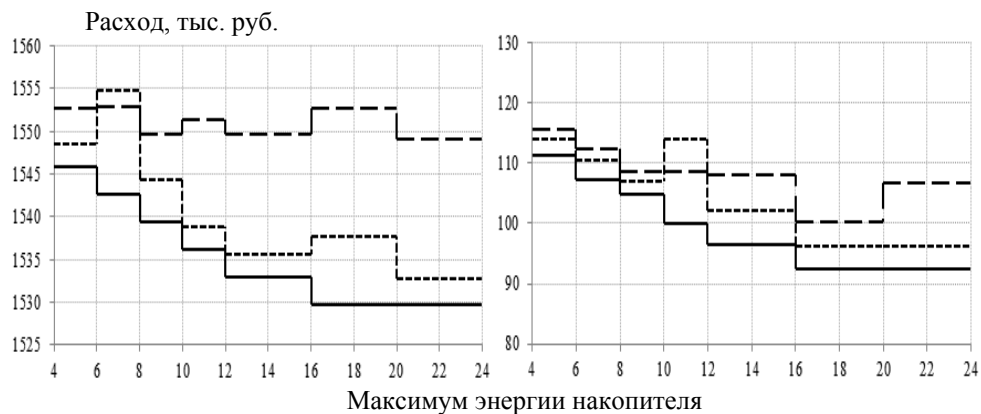
Таблица 5

Table 5

**Результаты оптимизации с возможностью продажи электроэнергии внешней системе и без обмена между ГП (вариант 2)**

**Optimization results with the possibility of selling electricity to the external system and without an exchange between the GSs (option 2)**

Энергия накопителя, МВт · ч	Рой частиц, рой пчел, рой светлячков		Градиент, среднее из 10		Градиент, лучшее из 10		Отклонение среднего градиента от оптимума, %	Отклонение лучшего градиента от оптимума, %
	ГП <sub>1</sub> , расход в сутки	ГП <sub>2</sub> , расход в сутки	ГП <sub>1</sub> , расход в сутки	ГП <sub>2</sub> , расход в сутки	ГП <sub>1</sub> , расход в сутки	ГП <sub>2</sub> , расход в сутки		
4,00	1,546	0,111	1,553	0,112	1,548	0,114	0,7	0,3
6,00	1,543	0,107	1,553	0,112	1,555	0,110	0,9	0,9
8,00	1,539	0,105	1,550	0,109	1,544	0,107	0,8	0,4
10,00	1,536	0,100	1,551	0,109	1,539	0,114	1,5	1,0
12,00	1,533	0,096	1,550	0,107	1,536	0,102	1,7	0,5
16,00	1,523	0,092	1,553	0,100	1,538	0,096	1,9	0,7
20,00	1,530	0,092	1,549	0,107	1,533	0,096	2,1	0,4
24,00	1,530	0,092	1,554	0,101	1,555	0,096	2,1	1,8



**Рис. 8. Влияние максимальной энергии накопителей на снижение расходов ГП при оптимальном управлении, вариант 2**

**Fig. 8. An effect of maximum battery energy on reducing the cost of GS with an optimal control (option 2)**

Таблица 6

Table 6

**Результаты оптимизации с возможностью продажи электроэнергии внешней системе и обменом между ГП (вариант 3)**

**Optimization results with the possibility of selling electricity to the external system and with an exchange between the GSs (option 3)**

Энергия накопителя, МВт · ч	Рой частиц, рой пчел, рой светлячков		Градиент, среднее из 10		Градиент, лучшее из 10		Отклонение среднего градиента от оптимума, %	Отклонение лучшего градиента от оптимума, %
	ГП <sub>1</sub> , расход в сутки	ГП <sub>2</sub> , расход в сутки	ГП <sub>1</sub> , расход в сутки	ГП <sub>2</sub> , расход в сутки	ГП <sub>1</sub> , расход в сутки	ГП <sub>2</sub> , расход в сутки		
4,00	1,505	0,006	1,512	0,014	1,509	0,009	1,0	0,4
6,00	1,502	0,002	1,512	0,012	1,507	0,006	1,3	0,7
8,00	1,498	-0,013	1,510	0,009	1,503	0,004	1,4	0,6
10,00	1,495	-0,002	1,511	0,007	1,500	0,000	1,7	0,5
12,00	1,492	-0,004	1,508	0,005	1,497	-0,002	1,7	0,5
16,00	1,489	-0,006	1,510	0,010	1,498	-0,003	2,5	0,8
20,00	1,489	-0,006	1,508	0,009	1,501	-0,002	2,2	1,0
24,00	1,489	-0,006	1,513	0,004	1,510	-0,007	2,3	1,4

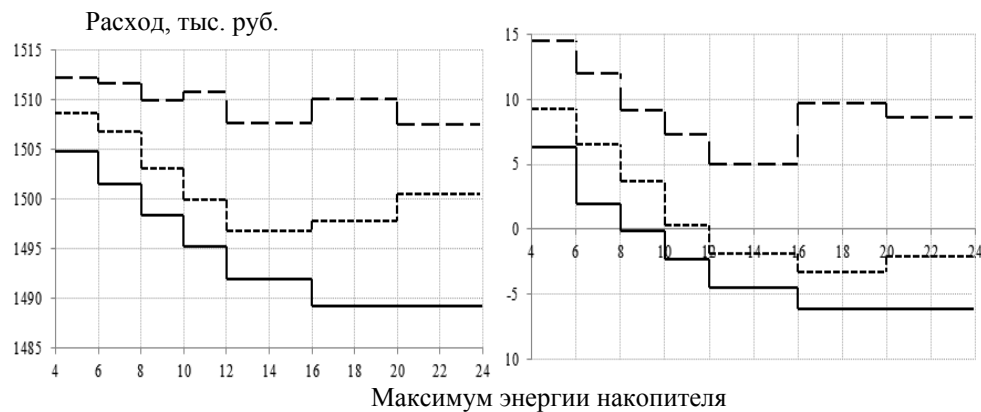


Рис. 9. Влияние максимальной энергии накопителей на снижение расходов ГП при оптимальном управлении, вариант 3

Fig. 9. An effect of maximum battery energy on reducing the cost of GS with an optimal control (option 3)

Суточные графики состояний и управляющих действий для ГП<sub>1</sub> (вариант 3 – обмен и с внешней электроэнергетической системой, и между ГП) при емкости накопителя 16 МВт показаны на рис. 10. Обозначения такие же, как использованы для рис. 4.

Из графика видно, что ГП<sub>1</sub> начинает запасать электроэнергию, пока действует более дешевый ночной тариф, а днем тратит ее. Потребности ГП<sub>1</sub>

в электроэнергии всё время выше выработки его ВЭУ, поэтому ему требуется часть энергии покупать у внешней электроэнергетической системы, часть – у соседнего ГП<sub>2</sub>. С трех до пяти часов ночи выработка ВЭУ снизилась у обоих ГП, поэтому на графике покупки электроэнергии у внешней системы ГП<sub>1</sub> наблюдается повышение в этот период времени (не может купить полностью у ГП<sub>2</sub>, так как ГП<sub>2</sub> не способен столько продать в этот период). Хотя приходится покупать у внешней системы по более высокой цене, чем у соседнего ГП, процесс накопления энергии не останавливается, поскольку в ночной период покупка у внешней системы дешевле, чем покупка днем у соседнего ГП.

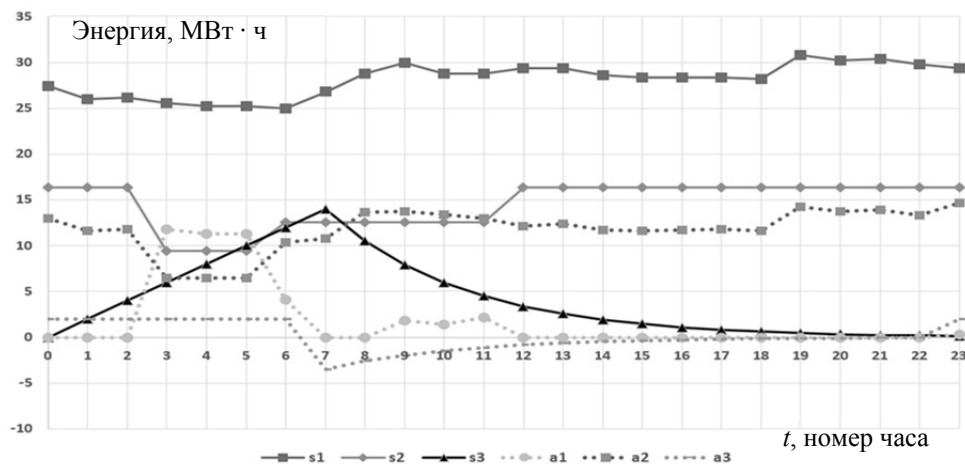


Рис. 10. Суточные графики состояний и действий ГП<sub>1</sub>, пример после оптимизации

Fig. 10. Daily charts of the states and the actions of GS<sub>1</sub>, the sample after optimization

**Программная реализация и время расчетов.** Данная задача не требует решения в режиме реального времени, поэтому в исследовании не уделялось большого внимания скорости расчетов. Алгоритмы реализованы на C++ без распараллеливания на процессоре i7-3630QM 2.4 Hz. Получение оптимального решения требовало 10...40 секунд. Разработанное приложение «Оптимизация режимов электропотребления при двусторонних потоках энергии путем выбора приоритетности правил на основе алгоритмов роевого интеллекта» зарегистрировано ФСИС РФ в Реестре программ для ЭВМ, свидетельство № 2018616447 от 01.06.2018.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для повышения энергоэффективности генерирующих потребителей с возобновляемыми источниками энергии в концепции Smart Grid целесообразно строить управляющую систему путем решения задачи оптимального управления в недетерминированных условиях. В работе задача оптимального управления была решена путем оптимизации правил, задающих управление ГП. В правилах не учитываются прогнозы собственного потребления и выработки генерирующего потребителя, а учитывается только его текущее состояние. Это снижает риск ошибки управления из-за неточностей прогно-



зов, что важно в условиях высокой зависимости выработки от труднопредсказуемой энергии ветра. Решение задачи оптимального управления позволяет ГП построить выгодную для себя политику взаимодействия с внешней электроэнергетической системой и соседними ГП.

2. Алгоритмы роевого интеллекта являются эффективным с точки зрения критерия оптимальности, скорости работы и сходимости к оптимальному решению. Все три используемых алгоритма (частиц, светлячков, пчел) дали одинаковые результаты. Задача может быть решена с несколько меньшей (1...2 %) точностью и градиентными алгоритмами, но это требует многократных запусков из-за попадания в локальные экстремумы, и поэтому глобальное решение задачи даже при многократных запусках не было найдено. Кроме того, показано, что неточность определения критерия оптимальности может искажать влияние различных параметров ГП на его потенциальную экономическую эффективность.

3. Емкость накопителя ГП является одним из важнейших факторов, позволяющих повышать его экономическую эффективность. Чем выше емкость накопителя (до некоторого предела, который определяется оптимизацией и моделированием), тем больше у ГП пространства для маневра, то есть больше вариантов и возможностей для выгодного обмена электроэнергий в Smart Grid системе с двусторонними потоками.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Манусов В.З., Хасанзода Н. Оптимизация энергоэффективности ветровых ресурсов Дальнего Востока на основе алгоритма роевого интеллекта // Альтернативная энергетика и экология (ISJAE). – 2018. – № 19–21. – С. 12–22.
2. Optimal scheduling for coordination renewable energy and electric vehicles consumption / D.L. Ha, H. Guillou, N. Martin, V.D. Cung, M. Jacomino // 2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2–5 November, 2015. – Miami, FL, 2015. – P. 319–324.
3. Load shedding and smart-direct load control using internet of things in smart grid demand response management / H. Mortaji, S. Siew, M. Moghavvemi, H. Almurib // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2017. – Vol. 53, iss. 6. – P. 5155–5163.
4. Shah P., Hussain I., Singh B. Multi-resonant FLL based control algorithm for grid interfaced multifunctional solar energy conversion system // IET Science, Measurement and Technology. – 2018. – Vol. 12, iss. 1. – P. 49–62.
5. Сокольникова Т.В., Суслов К.В., Ломбарди Л. Определение оптимальных параметров накопителя для интеграции возобновляемых источников энергии в изолированных энергосистемах с активными потребителями // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 10 (105). – С. 206–211.
6. Манусов В.З., Хасанзода Н., Бобоев Ш.А. Исследование оптимальных режимов интеллектуальных сетей с двухсторонним потоком энергии // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3. – С. 175–190.
7. Растринин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. – М.: Советское радио, 1980. – 232 с.
8. Ногин В.Д. Введение в оптимальное управление: учебно-методическое пособие. – СПб.: ИУТАС, 2008. – 92 с.
9. Манусов В.З., Хасанзода Н., Матренин П.В. Повышение энергоэффективности ветроэнергетических установок на основе роевого интеллекта // Новое в российской энергетике. – 2018. – № 10. – С. 36–43.
10. Swarm intelligence and bio-inspired computation: theory and applications / ed. by X.-Sh. Yang et al. – Amsterdam; Boston: Elsevier, 2013. – 450 p.

11. Матренин П.В. Разработка адаптивных алгоритмов роевого интеллекта в проектировании и управлении техническими системами: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Томск, 2018. – 197 с.

12. Матренин, П.В., Манусов В.З. Адаптивный алгоритм роя частиц в задачах оперативного планирования // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2016. – № 4 (142). – С. 11–15.

13. Глебов Н.И., Кочетов Ю.А., Плясунов А.В. Методы оптимизации: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2000. – 105 с.

*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

*Матренин Павел Викторович*, кандидат технических наук, ассистент кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – применение методов искусственного интеллекта для проектирования и оптимизации технических систем. Имеет 40 публикаций. E-mail: pavel.matrenin@gmail.com

*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 20 публикаций. E-mail: nasrullo-5445@mail.ru

*Manusov Vadim Zinovevich*, D.Sc. (Eng.), professor at the Department of Industrial Power Supply Systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests include application of intelligent information technologies and methods of artificial intelligence for analysis, planning and optimization of electric power systems. He is the author of 220 scientific papers including 5 monographs. E-mail: manusov36@mail.ru.

*Matrenin Pavel Victorovich*, PhD (Eng.), an assistant lecturer at the Department of Industrial Power Supply Systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests are focused on the application of artificial intelligence methods for designing and optimizing engineering systems. He has published 40 research papers. E-mail: pavel.matrenin@gmail.com

*Khasanzoda Nasrullo*, a postgraduate student at the Department of Industrial Power Supply Systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests include study of intelligent grids with renewable energy sources and their management based on artificial intelligence methods. He is the author of 20 scientific papers. E-mail: nasrullo-5445@mail.ru.

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-115-134

***Application of swarm intelligence algorithms to energy management by a generating consumer with renewable energy sources\****V.Z. MANUSOV<sup>a</sup>, P.V. MATRENIN<sup>b</sup>, N. KHASANZODA<sup>c</sup>

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

<sup>a</sup> manusov36@mail.ru    <sup>b</sup> pavel.matrenin@gmail.com    <sup>c</sup> nasrullo-5445@mail.ru**Abstract**

The paper considers the problem of optimal control of a generating consumer with renewable energy sources in a smart grid with distributed generation and two-way energy flows. It is shown that management must be performed in non-deterministic conditions due to the impossibility of accurate forecasting of power generation by renewable sources. To control the generating consumer, a model of control action selection based on a set of logical rules is used. Therefore, it's necessary to solve the structural-parametric optimization of the order of the rules list and the values of rules numerical parameters. In contrast to the existing studies, the problem of optimal control is considered from the point of view of a separate generating consumer, and not of the entire distributed system, as well as control without an explicit use of forecasts of energy production and consumption. The solution of this optimization problem is performed by three swarm intelligence algorithms (Particle Swarm Optimization, Bee Algorithm, Firefly Optimization) and by the gradient descent algorithm. Computational experiments were carried out for models of wind energy systems on Russky Island and Popov Island (Far East). The results obtained showed a high effectiveness of the swarm intelligence algorithms that demonstrated a reliable and fast convergence to the global extremum of the optimization problem under different scenarios and parameters of generating consumers. Also, the paper carries out the analysis of the influence of the capacity of the batteries of the generating consumer on the variability of its actions. The variability, in turn, affects an increase in the generating consumer benefits from the interchange of energy with the external global power system and neighboring generating consumers. The paper gives the rationale for the economic benefits of increasing the capacity of energy storage to a certain limit, which can be determined by the proposed method.

**Keywords:** generating consumer, swarm intelligence, structural-parametric optimization, optimal control, renewable energy, smart grid

**REFERENCES**

1. Manusov V.Z., Khasanzoda N. Optimizatsiya energoeffektivnosti vetrovykh resursov Dal'nego Vostoka na osnove algoritma roevogo intellekta [Optimization of the Far East wind resources energy efficiency on the basis of the swarm intelligence algorithm]. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya (ISJAE) – Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2018, no. 19–21, pp. 12–22. (In Russian).
2. Ha D.L., Guillou H., Martin N., Cung V.D., Jacomino M. Optimal scheduling for coordination renewable energy and electric vehicles consumption. *2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, 2–5 November, 2015, Miami, FL, pp. 319–324.
3. Mortaji H., Siew S., Moghavvemi M., Almurib H. Load shedding and smart-direct load control using internet of things in smart grid demand response management. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, vol. 53, iss. 6, pp. 5155–5163.
4. Shah P., Hussain I., Singh B. Multi-resonant FLL based control algorithm for grid interfaced multifunctional solar energy conversion system. *IET Science, Measurement and Technology*, 2018, vol. 12, iss. 1, pp. 49–62.

---

\* Received 28 February 2019.

5. Sokolnikova, T.V., Suslov K.V., Lombardi, L. Opredelenie optimal'nykh parametrov nakopitelya dlya integratsii vozobnovlyаемых istochnikov energii v izolirovannykh energosistemakh s aktivnymi potrebitel'yami [Determining optimal energy storage parameters for renewable energy sources integration in isolated energy system with active consumers]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, vol. 10 (105), pp. 206–211.
6. 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, pp. 175–190.
7. Rastrigin L.A. *Sovremennye printsipy upravleniya slozhnymi ob"ektami* [Modern principles of management of complex objects]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1980. 232 p.
8. Nogin V.D. *Vvedenie v optimal'noe upravlenie* [Introduction to optimal control]. St. Petersburg, YuTAS Publ., 2008. 92 p.
9. Manusov V.Z., Khasanzoda N., Matrenin P.V. Povyshenie energoeffektivnosti vetroenergeticheskikh ustanovok na osnove roevogo intellekta [Improving the energy efficiency of wind power plants on based swarm intelligence]. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike – New in the Russian Electrical Power-Engineering*, 2018, no. 10, pp. 36–43.
10. Yang X., etc., eds. *Swarm intelligence and bio-inspired computation: theory and applications*. Amsterdam, Boston, Elsevier, 2013. 450 p.
11. Matrenin P.V. *Razrabotka adaptivnykh algoritmov roevogo intellekta v proektirovanii i upravlenii tekhnicheskimi sistemami*. Diss. kand. tekhn. nauk [Adaptive swarm intelligence algorithms in design and control of technical systems. PhD eng. sci. diss.]. Tomsk, 2018. 197 p.
12. Matrenin P.V., Manusov V.Z. [Adaptive Particle Swarm Optimization for the Operational Scheduling Problem] // *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologi – Herald of computer and information technologies*, 2016, Vol. 4 (142), P. 11–15. (In Russian).
13. Glebov N.I., Kochetov Yu.A., Plyasunov A.V. *Metody optimizatsii* [Optimization methods]. Novosibirsk, NSU Publ., 2000. 105 c.

Для цитирования:

Манусов В.З., Матренин П.В., Хасанзода Н. Применение алгоритмов роевого интеллекта в управлении генерирующим потребителем с возобновляемыми источниками энергии // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 3 (76). – С. 115–134. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-115-134.

For citation:

Manusov V.Z., Matrenin P.V., Khasanzoda N. Primenenie algoritmov roevogo intellekta v upravlenii generiruyushchim potrebitелем s vozobnovlyаемыми istochnikami energii [Application of swarm intelligence algorithms to energy management by a generating consumer with renewable energy sources]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3 (76), pp. 115–134. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-115-134.