

УДК: 621.316:004.942:519.853

С.А. Рожкова, В.Ф. Белов

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПИСАНИЯ РАБОТЫ ЛОКАЛЬНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

**Рожкова Светлана Александровна**, окончила факультет математики и информационных технологий Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева, аспирант, преподаватель кафедры «Системы автоматизированного проектирования» МГУ им. Н.П. Огарева. Имеет статьи в области разработки математических моделей управления электрическими нагрузками. [e-mail: rozhkova\_sa@mail.ru].

**Белов Владимир Федорович**, доктор технических наук, профессор, окончил факультет электронной техники МГУ им. Н.П. Огарева, заведующий кафедрой «Системы автоматизированного проектирования» МГУ им. Н.П. Огарева. Имеет статьи, монографии, изобретения в области проектирования автономных электроэнергетических систем с управляемыми показателями качества электрической энергии. [e-mail: belovvf@mail.ru].

### Аннотация

Современная энергетика характеризуется устойчивыми тенденциями развития малой распределённой энергетики (микросетей) и внедрением возобновляемых источников электрической энергии в качестве её элементов. В таких системах стало актуальным и возможным применение локальных накопителей электрической энергии для автоматического управления её потреблением. Эти устройства существенно повышают надежность и энергетические характеристики электроснабжения за счет оптимального выбора источников электрической энергии и их оперативного подключения к потребителям. В рамках данной статьи рассматривается алгоритм оптимального управления системой электроснабжения, состоящей из двух источников энергии – накопителя и центральной системы электроснабжения с дискретной тарификацией. Приведена постановка задачи генерации алгоритма оптимального управления, как задачи составления расписания работы накопителя электрической энергии по критерию минимизации затрат на электроснабжение потребителей. В пределах заданного в расписании интервала времени обеспечивается микропроцессорное управление силовой схемой накопителя. В качестве численного метода оптимизации обоснован выбор метода роя частиц. Проведена серия вычислительных экспериментов, на основе результатов которых сделан вывод об эффективности алгоритма оптимизации управления работой накопителя электрической энергии, а также даны рекомендации по его дальнейшему усовершенствованию для программирования микропроцессора.

Ключевые слова: управление, микросеть, энергопотребление, накопитель электрической энергии, оптимизация, нелинейное программирование, метод роя частиц.

## OPTIMAL SCHEDULING OF LOCAL BATTERY STORAGE

**Svetlana Aleksandrovna Rozhkova**, graduated from the Faculty of Mathematics and Information Technologies at Ogarev Mordovia State University; Post-graduate Student, Lecturer of the Department of Computer-Aided Design at Ogarev Mordovia State University; an author of articles in the field of mathematical modeling of home energy management systems. e-mail: rozhkova\_sa@mail.ru.

**Vladimir Fedorovich Belov**, Doctor of Engineering, Professor; graduated from the Faculty of Electronics at Ogarev Mordovia State University; Head of the Department of Computer-Aided Design at Ogarev Mordovia State University; an author of articles, monographs, and inventions in the field of the design of autonomous electric power systems, in which power quality parameters are controllable. e-mail: belovvf@mail.ru.

### Abstract

Nowadays energetics is characterized by consistent trend of the development of distributed power generation systems (microgrids) and alternative energy sources implementation as its components. In these systems using local electric batteries became actual and possible for automatic energy consumption management. These devices significantly increase the reliability and electronic characteristics of electricity supply through optimal choice of energy sources using rapid connection of the power sources to the power consumers. The authors analyze the algorithm for optimal control of the power system consisting of two energy sources – one of them is battery storage and another one is external centralized grid where

time-varying electricity pricing is released. The problem of finding the algorithm for optimal control generation as a task of the creating working timetable of electric storage, which has to minimize expenses for power supply is considered. Within a given time interval, a microprocessor controls a power storage battery releasing process. Particle Swarm Optimization (PSO) is selected as a numerical method for solving this problem. Based on experiment numerical results that were performed, conclusions about effectiveness of developed battery schedule optimization algorithm are given; also recommendations were given for further improvements of microprocessor programming.

Key words: control, microgrid, electric energy consumption, battery energy storage, optimization, non-linear programming, particle swarm optimization.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых направлений развития энергетики являются разработка и внедрение новых технологий производства и распределения электрической энергии – создание «умных» микросетей (Smart Microgrids).

Микросеть – это автономная электрическая сеть, объединяющая несколько локальных потребителей и источников энергии. Поскольку микросетевые технологии ориентированы на использование местных возобновляемых источников, исчезает необходимость транспортировки энергии на большие расстояния, что значительно уменьшает ее потери. Кроме того, микросети способствуют повышению надежности энергоснабжения за счет оперативного переключения пользователей между общей энергосетью и местными источниками энергии.

Множество взаимодействующих друг с другом микросетей, подключенных к центральным системам электроснабжения, называется распределенной энергосистемой.

Рассмотрим микросеть, включающую нескольких пользователей. Под пользователем микросети будем понимать обладателя накопительных зарядных устройств и собственных устройств генерации электрической энергии, например, солнечных батарей или ветряных генераторов. В общем случае пользователь имеет три способа получения необходимого количества электрической энергии для обеспечения своих нужд [1]:

1. питание от центральной системы электроснабжения;
2. покупка необходимого количества электроэнергии у других пользователей микросети;
3. использование электроэнергии, запасенной в собственном накопительном устройстве.

С целью минимизации финансовых затрат пользователя на электроэнергию необходимо осуществить оптимальное комбинирование этих трех способов в течение заданного временного промежутка  $T$ , который в дальнейшем будем называть периодом планирования. В этом случае в каждый момент времени  $t \in T$  формируется так называемый энергетический пакет, который может быть представлен функцией  $e(t) = (e_1(t), e_2(t), e_3(t))$ , где  $e_1(t)$  – количество электроэнергии, полученное из центральной сети электроснабжения, в которой реализуется принцип дифференцируемой тарификации;  $e_2(t)$  – количество электроэнергии, полученное от других пользователей микросети:  $e_2(t) = \sum_{i=1}^m e_{2i}(t)$ , где  $e_{2i}(t)$  – количество

электроэнергии, закупленное у  $i$ -го потребителя,  $i = \overline{1, m}$ ,  $m$  – количество пользователей;  $e_3(t)$  – количество электроэнергии, взятой из собственного накопителя.

Энергию, запасенную в накопителе, в зависимости от способа ее получения, можно подразделить на 3 вида:

1. энергия, закупленная из центральной сети;
2. энергия, закупленная у других пользователей микросети;
3. энергия, выработанная собственными устройствами электрогенерации.

Тогда  $e_3(t)$  можно представить в виде суммы:

$$e_3(t) = e_{31}(t) + e_{32}(t) + e_{33}(t),$$

где  $e_{31}(t)$ ,  $e_{32}(t)$  и  $e_{33}(t)$  – количество используемой электроэнергии первого, второго и третьего видов соответственно.

Общее количество электроэнергии, составляющей энергетический пакет и необходимой для удовлетворения нужд пользователя микросети в момент времени  $t$ :

$$E(t) = e_1(t) + e_2(t) + e_3(t).$$

Все нагрузки пользователя микросети могут быть разделены на два типа:

1. нагрузки, время включения которых не принципиально для потребителя;
2. нагрузки, время включения которых принципиально важно для потребителя.

К первому типу можно отнести те нагрузки, которые должны отработать в течение определенного периода времени (например, в течение суток), но момент их включения не представляет значимости. Примером таких нагрузок могут быть стиральная машина, зарядные устройства и др. Ко второму типу относится подавляющее большинство бытовых нагрузок (освещение, кондиционер, телевизор и др.).

Таким образом, задача минимизации затрат конечного пользователя на электроэнергию сводится к решению двух подзадач:

1. составление оптимального расписания работы нагрузок первого типа;
2. формирование оптимального энергетического пакета.

Модель и метод решения первой задачи были исследованы нами ранее [2]. Рассмотрим решение второй задачи. Следует заметить, что на формирование энергетического пакета влияет объем продаж потребителем собственной электроэнергии. Этот аспект в данной статье не рассматривается.

Результатом решения второй задачи должны стать ответы на следующие вопросы: когда, откуда и сколько

электроэнергии нужно закупить; когда и в каком количестве следует потратить электроэнергию, запасенную в накопителе.

Исходными данными для второй задачи являются текущий тариф на электрическую энергию и график потребления электроэнергии, определяющий, как должен изменяться уровень потребления энергетических услуг в течение периода планирования. В случае дифференцируемой тарификации стоимость вырабатываемой электрической энергии изменяется через определенный фиксированный промежуток времени, который в дальнейшем будем называть периодом фиксированной величины тарифа. График потребления должен быть спрогнозирован заранее на основе имеющихся статистических данных о работе нагрузок второго типа, а также с учетом решения первой задачи.

Энергия, закупленная по определенной цене у того или иного поставщика, может использоваться не только на текущие нужды, но и для заряда накопителя, чтобы создать запасы для использования в момент, когда цены на электроэнергию достигают пиковых значений. Таким образом, важнейшим этапом решения задачи формирования оптимального энергетического пакета является решение задачи составления оптимального расписания работы накопителя.

Рассмотрим упрощенный вид этой задачи. Предположим наличие одного пользователя и одного внешнего источника электрической энергии – центральной системы электроснабжения с дифференцируемой тарификацией стоимости поставляемой электроэнергии. Пусть пользователь обладает накопительным зарядным устройством, но его взаимодействие с другими пользователями микросети по каким-либо причинам в данный момент невозможно. При этих условиях необходимо решить задачу составления оптимального расписания работы накопителя в условиях дифференцированной тарификации с целью минимизации финансовых затрат пользователя. Это значит, что на каждом временном интервале, соответствующем периоду фиксированной величины тарифа, необходимо осуществить выбор, использовать ли в данный момент электрическую энергию накопителя или внешнего источника, заряжать или не использовать накопитель.

### 1 Постановка задачи оптимизации управления работой локального накопителя

Пусть имеем случай почасовой тарификации. **Исходными данными** задачи являются:

- период фиксированной величины тарифа (один час);
- период планирования, состоящий из  $n$  временных интервалов, каждый из которых равен периоду фиксированной величины тарифа (одному часу);
- $c(c_0, \dots, c_n)$  – тариф на электроэнергию в течение периода планирования;
- $cons(cons_0, \dots, cons_n)$  – график почасового электропотребления в течение периода планирования;

- $b_{max}$  – максимальная емкость батареи накопителя (далее батарея);
- $b_{in}$  – начальный заряд батареи;
- $b_{ph}$  – максимальное количество электроэнергии, накапливаемой батареей за период фиксированной величины тарифа (за час).

**Решением задачи** является вектор  $x(x_0, \dots, x_n)$ , отражающий оптимальный график работы батареи, причем для всех  $i = \overline{0, n}$ :

- если  $x_i < 0 \Rightarrow$  батарея разряжается на  $x_i$  единиц энергии;
- если  $x_i = 0 \Rightarrow$  батарея не используется;
- если  $x_i > 0 \Rightarrow$  батарея заряжается на  $x_i$  единиц энергии.

Целевая функция, отражающая затраты пользователя микросети, имеет вид:

$$F(x) = \sum_{i=0}^n c_i (cons_i + x_i) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$d_i \leq x_i \leq s_i, \quad i = \overline{0, n}, \quad (2)$$

где  $d_i$  – максимальное количество электроэнергии (в пределах необходимого), которое может обеспечить батарея в течение  $i$ -го часа:

$$d_i = \begin{cases} -b_i, & b_i < cons_i \\ -cons_i, & b_i \geq cons_i \end{cases}, \quad i = \overline{0, n};$$

$b_i$  – количество энергии, запасенной в батарее на начало  $i$ -го часа:

$$b_i = \begin{cases} b_{in}, & i = 0, \\ b_{in} + \sum_{j=0}^{i-1} x_j, & i = \overline{1, n}. \end{cases}$$

$s_i$  – максимальное количество энергии, которое может запасти батарея за  $i$ -й час:

$$s_i = \begin{cases} b_{ph}, & b_{max} - b_i \geq b_{ph}; \\ b_{max} - b_i, & b_{max} - b_i < b_{ph}, \\ 0, & b_{max} - b_i = 0. \end{cases} \quad i = \overline{0, n};$$

Запишем ограничения (2) в виде:

$$\begin{cases} d_0(b_{in}) \leq x_i \leq s_0(b_{in}), \\ d_i(x_0, \dots, x_{i-1}) \leq x_i \leq s_i(x_0, \dots, x_{i-1}), \end{cases} \quad (3)$$

где  $i = \overline{1, n}$ .

Преобразуем ограничения (3) к следующему виду:

$$\begin{cases} s_0(b_{in}) - x_0 \geq 0, \\ x_0 - d_0(b_{in}) \geq 0, \\ \left. \begin{matrix} x_i - d_i(x_0, \dots, x_{i-1}) \geq 0 \\ s_i(x_0, \dots, x_{i-1}) - x_i \geq 0 \end{matrix} \right\} i = \overline{1, n}. \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, получаем задачу нелинейного программирования:

$$F(x) = \sum_{i=0}^n c_i (cons_i + x_i) \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$i = \overline{0, n},$$

$$\begin{cases} s_0(b_{in}) - x_0 \geq 0, \\ x_0 - d_0(b_{in}) \geq 0, \\ \left. \begin{cases} x_i - d_i(x_0, \dots, x_{i-1}) \geq 0 \\ s_i(x_0, \dots, x_{i-1}) - x_i \geq 0 \end{cases} \right|_{i=\overline{1, n}} \end{cases} \quad (6)$$

## 2 МЕТОД РОЯ ЧАСТИЦ

Не все функции ограничений (6) имеют непрерывные частные производные, что делает затруднительным применение стандартных методов решения задач нелинейного программирования. Рассмотрим решение данной задачи методом роя частиц (Particle Swarm Optimization) [3, 4]. В этом случае можно избежать явного описания пространства возможных решений.

Метод роя частиц относится к методам искусственного интеллекта и применим для поиска приближенных решений крайне сложных или нерешаемых задач нахождения числовых максимумов и минимумов. Под частицами понимаются абстрактные объекты, обладающие двумя свойствами: позицией и скоростью. При этом позиция частицы представляет собой возможное решение задачи оптимизации, а скорость частицы отражает ее направление к новому, предположительно, лучшему, решению. Количество частиц в рое задается произвольным образом. Каждой частице также известны наилучшая позиция, найденная ею на данный момент, и наилучшая позиция среди всех частиц. При этом под наилучшей позицией понимается позиция, соответствующая минимальному (максимальному) значению целевой функции.

Канонический вариант метода описывает движение частиц следующим образом:

$$v_{i,k}^{t+1} = \omega \cdot v_{i,k}^t + c_1 \cdot r_1(t) \cdot (p_{Gb,i}^t - p_{i,k}^t) + c_2 \cdot r_2(t) \cdot (p_{Pb,i}^t - p_{i,k}^t), \quad (7)$$

$$p_{i,k}^{t+1} = p_{i,k}^t + v_{i,k}^{t+1}, \quad (8)$$

где  $P(p_{1,k}, \dots, p_{n,k})$  и  $V(v_{1,k}, \dots, v_{n,k})$  – позиция и скорость  $k$ -й частицы;

коэффициенты  $\omega$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  – весовая доля инерции, когнитивная и глобальная весовые доли соответственно;

$r_1(t)$ ,  $r_2(t)$  – случайные числа, лежащие в диапазоне  $[0, 1]$ ;

$p_{Gb,i}^t$  – лучшая известная позиция, найденная на данный момент среди всех частиц в рое;

$p_{Pb,i}^t$  – лучшая позиция  $i$ -й частицы, найденная ею на данный момент.

При решении задачи (5)–(6) на основе процедуры (7)–(8) в качестве ограничений для элементов вектора  $x$  рассматривались ограничения вида:

$$-b_{max} \leq x_i \leq b_{ph}, \quad i=\overline{0, n}. \quad (9)$$

При этом на каждом шаге выполнялась проверка текущего значения вектора  $x$  (для каждой частицы) на соот-

ветствие ограничениям (6). Если значение вектора  $x$  не удовлетворяло ограничениям задачи, то функция принимала заведомо большое значение и данное решение отбраковывалось. Таким образом, удалось избежать явного описания пространства возможных решений, которое, в данном случае, весьма сложное для представления.

## 3 ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для тестирования выбранного метода рассмотрим простую задачу оптимизации работы локального накопителя, решение которой может быть легко найдено на основе аналитических рассуждений.

Пусть период планирования составляет шесть часов – с 00:00 до 06:00 часов утра. Зададим следующие начальные данные:

- количество временных интервалов  $n=6$ ;
- тариф на электроэнергию в течение суток (тарификация – почасовая)  $c(c_0, \dots, c_5)$  (табл. 1). В качестве величины измерения тарифа будем рассматривать денежные единицы (д. е.):

Таблица 1

Тарификация электроэнергии

№ врем. интервала	Время суток, ч	Тариф, д. е.
1	0:00–1:00	10
2	1:00–2:00	10
3	2:00–3:00	11
4	3:00–4:00	10
5	4:00–5:00	20
6	5:00–6:00	25

- график почасового электропотребления в течение рассматриваемого периода  $cons(cons_0, \dots, cons_5)$ :

Таблица 2

Потребление электрической энергии

№ врем. интервала	Время суток, ч	Потребление, кВт·ч
1	0:00–1:00	5
2	1:00–2:00	5
3	2:00–3:00	5
4	3:00–4:00	5
5	4:00–5:00	5
6	5:00–6:00	20

- максимальная емкость батареи  $b_{max} = 20$  кВт·ч;
- начальный заряд батареи  $b_{in} = 0$  кВт·ч;
- максимальное количество электроэнергии, накапливаемой батареями за час  $b_{ph} = 5$  кВт·ч.



В случае если батарея не используется для электро-снабжения, расходы потребителя для обеспечения его нужд будут составлять 805 д. е.

Очевидно, что для минимизации расходов при вы-бранных исходных данных необходимо заряжать батарею на протяжении первых четырех часов, а затем использо-вать накопленную энергию в течение шестого часа (то есть с 5:00 до 6:00), т. е. оптимальное решение задачи представляет собой вектор  $x = (5,5,5,5,0,-20)$ . При таком режиме работы батареи затраты потребителя составят 510 д. е. Таким образом, экономия составит 295 д. е. График, соответствующий оптимальному решению, приведен на рисунке 1.

Вычислительный эксперимент проводился многократ-но при тех же исходных данных и следующих параметрах метода роя частиц: количество частиц – 50; точность – 0,01. При каждом эксперименте вы-числялся график работы бата-реи, т. е. вектор  $x(x_0, \dots, x_n)$ . Результаты обработки экспе-римента для 10-ти наиболее характерных случаев отраже-ны в таблице 3. Эти результаты отличаются из-за наличия слу-чайных величин при каждой реализации метода оптимиза-ции.

Первая строка таблицы соответствует оптимальному решению, полученному выше аналитическим путем. Каждая из десяти следующих строк соответствует одному испыта-нию. Данные второго столбца отражают количество итера-ций, за которое было получено решение с заданной точностью. Данные в третьем столбце отражают время, затраченное на выполнение соответствующего испытания. Данные в четвер-том и пятом столбцах отража-ют количество сэкономленных денежных средств в резуль-тате применения полученного графика работы накопителя. Средние значения всех пока-зателей приведены в послед-ней строке. Решения, близкие к оптимальным, удалось полу-чить в 80% случаев, а средняя экономия составила 32%.

Графики решений, полу-ченных в результате каждого из десяти экспериментов, при-ведены на рисунке 2.

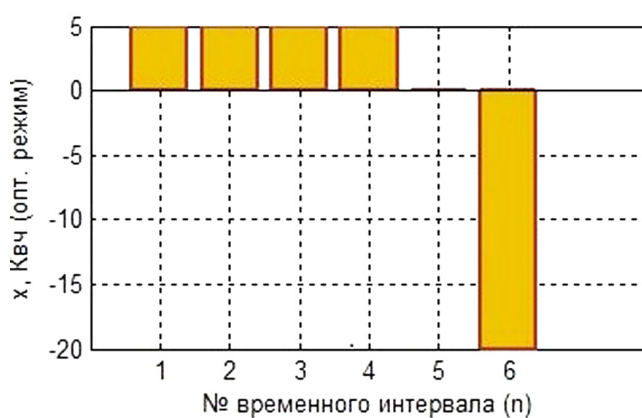


Рис. 1. График оптимального решения

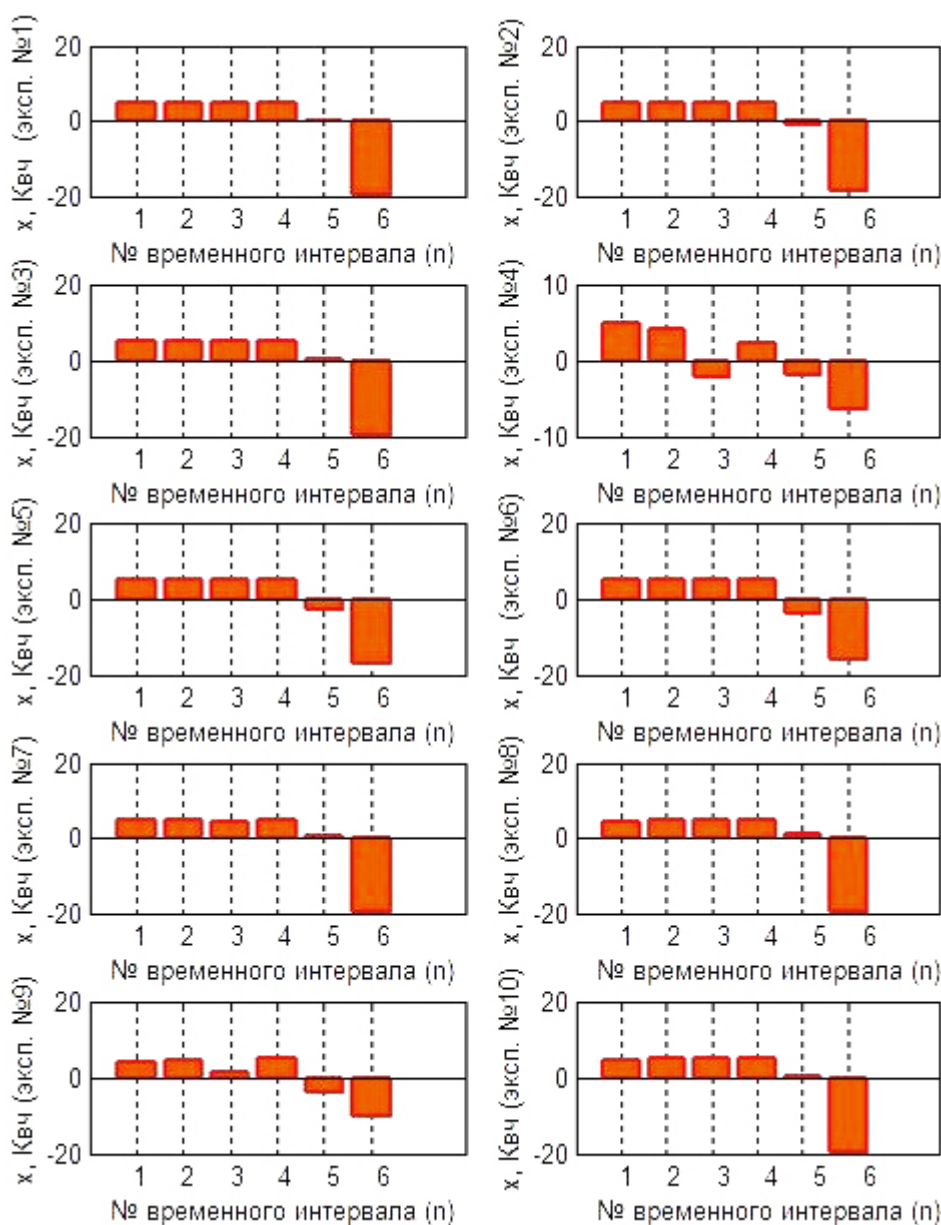


Рис. 2. Графики решений

Результаты эксперимента

№ эксп.	Количество итераций	Время, с	Экономия, д. е.	Экономия, %	Значение целевой функции
Оптимальное решение			295	36,6460	510
1	673	634,2221	293,6961	36,4840	511,3039
2	323	299,9119	287,8740	35,7607	517,1260
3	490	452,2469	294,8184	36,6234	510,1816
4	55	49,8579	113,7596	14,1316	691,2404
5	414	384,4021	278,8068	34,6344	526,1932
6	588	555,6912	275,7257	34,2516	529,2743
7	287	266,8865	288,5160	35,8405	516,484
8	536	503,8832	285,6226	35,4811	519,3774
9	70	65,5516	187,3808	23,2771	617,6192
10	514	487,9087	289,7617	35,9952	515,2383
<b>Среднее:</b>					
	395	370,0562	259,5962	32,24796	545,4038

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам вычислительных экспериментов получены следующие важные для дальнейшего исследования выводы и рекомендации:

- постановка задачи нелинейного программирования в виде (5, 6) и исследование её решения методом роя частиц показали эффективность разработанной модели управления накопителем электрической энергии для повышения надежности электроснабжения потребителей;
- при реализации разработанной модели управления необходимо провести дополнительные исследования границ ее применимости в зависимости от типа микропроцессора и шага дискретизации процесса управления;
- для ускорения решения задачи составления расписания работы накопителя следует рассмотреть возможности параллельных вычислений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Belov V., Butkina A., Bolschikov F., Leisner P., Belov I. Power quality and EMC solutions in micro grids with energy-trading capability // Proc. of the 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2014), Gothenburg, Sweden, September 1-4, 2014. IEEE Catalog Number CFP1406F-USB, ISBN 978-1-4799-3225-2.
2. Рожкова С.А., Белов В.Ф., Буткина А.А. Построение оптимального графика потребления электрической энергии в микросетях // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9, ч. 11. – С. 2416–2420.

3. Kennedy J. and Eberhart R. Particle swarm optimization // Proc. 1995 IEEE Int. Conf. Neural Netw. Vol. 4.

4. Parsopoulos K.E., Vrahatis M.N. Recent approaches to global optimization problems through Particle Swarm Optimization // Department of Mathematics, University of Patras Artificial Intelligence Research Center, (UPAIRC), University of Patras, GR-26110 Patras, Greece, 2002.

### REFERENCES

1. Belov V., Butkina A., Bolschikov F., Leisner P., Belov I. Power Quality and EMC Solutions in Micro Grids With Energy-trading Capability. Proc. of the 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2014). Gothenburg, Sweden, September 1-4, 2014, IEEE Catalog Number CFP1406F-USB, ISBN 978-1-4799-3225-2.
2. Rozhkova S.A., Belov V.F., Butkina A.A. Postroenie optimalnogo grafika potrebleniia elektricheskoi energii v microsetiakh [Optimal Electric Energy Consumption Scheduling for Microgrids]. *Fundamentalnye issledovaniia* [Fundamental Studies], 2014, no. 9, part 11, pp. 2416–2420.
3. Kennedy J. and Eberhart R. Particle Swarm Optimization. Proc. 1995 IEEE Int. Conf. Neural Netw., vol. 4.
4. Parsopoulos K. E., Vrahatis M.N. Recent Approaches to Global Optimization Problems Through Particle Swarm Optimization. Department of Mathematics at University of Patras Artificial Intelligence Research Center, (UPAIRC), University of Patras, GR-26110 Patras, Greece, 2002.