

УДК 621.316:004.942:519.853

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Белов В.Ф., Рожкова С.А., Фарафонов Д.В.

ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева»,
Саранск, e-mail: belovvf@mail.ru

В статье рассмотрена экспериментальная оценка модели оптимального управления накопителем электрической энергии на физическом макете базовой микросети, состоящей из накопителя электрической энергии и подключенной к нему нагрузки. Накопитель представляет собой энергетический роутер и аккумуляторную батарею. Роутер управляет потоками электрической мощности, поступающей из сети электроснабжения 0,4 кВ, отдавая её в батарею, или нагрузки, или возвращая в сеть. Экспериментальное исследование проводилось в два этапа. При выполнении первого этапа были исследованы функциональные возможности модели оптимального управления накопителем на предмет экономии затрат на электрическую энергию. Вторым этапом заключался в анализе эффективности программного обеспечения, реализующего данную модель. На основе данных, полученных в результате выполнения экспериментального исследования, сделан вывод об эффективности рассматриваемой модели управления и возможности применения разработанного на её основе программного обеспечения как готового продукта при реализации микросетей.

Ключевые слова: микросеть, оптимизация, энергопотребление, накопитель электрической энергии, дифференцированная тарификация, нелинейное программирование, метод роя частиц

EXPERIMENTAL VALIDATION OF OPTIMAL BATTERY SCHEDULING MODEL

Belov V.F., Rozhkova S.A., Farafonov D.V.

N.P. Ogarev Mordovia State University, Saransk, e-mail: belovvf@mail.ru

The article describes the experimental validation of optimal battery scheduling model on the physical model of the base microgrid, consisting of the electric energy storage and the load connected to it. Electric energy storage consists of battery storage and a router. The router controls the flow of electric power coming from the power supply network of 0,4 kW, giving it to the battery or load, or returning it to the network. An experimental study was conducted in two stages. In the first stage of the experimental study the functionalities of the optimal battery scheduling model in order to minimize consumer spending were tested. In the second stage was to analyze the effectiveness of the software that implements the model. On the basis of data obtained as a result of the experimental study, the conclusion was that the optimal battery scheduling model is effective and it is possible to apply the associated software as a finished product in the implementation of microgrids.

Keywords: microgrid, optimization, electric energy consumption, battery storage, time-varying pricing, non-linear programming, particle swarm optimization

Современное состояние электроэнергетики характеризуется интеграцией электростанций и систем аккумулирования электроэнергии различных типов и мощностей путем подключения их к энергосистеме по стандартизованным процедурам технического присоединения и переходом к созданию «микросетей» (microgrid – англ.) на стороне конечных пользователей.

Для решения вопросов интеграции разработана концепция Smart Grid, близкая концепции Plug and Play («подключи и работай»), применяемой в современных компьютерных системах. В соответствии с [5] микросеть представляет собой группу взаимосвязанных электрических нагрузок и распределенных энергетических ресурсов, включающих возобновляемые источники и накопители электрической энергии, которая функционирует в рамках четко определенных границ как единый управляемый объект. При соответствии протоколам Smart Grid и установленным процедурам

технического присоединения микросеть стандартным образом подключается к энергосистеме. К объектам с такими свойствами относятся микросети домохозяйств, групп домохозяйств, промышленных предприятий, технопарков и др.

Пусть имеем микросеть, состоящую из накопителя электрической энергии и подключенной к нему нагрузки. Накопитель представляет собой энергетический роутер и аккумуляторную батарею. Роутер управляет потоками электрической мощности, поступающей из сети электроснабжения 0,4 кВ, отдавая её в батарею, или нагрузки, или возвращая в сеть. Он также реализует режимы питания нагрузок только от батареи и «энергетическим пакетом», состоящим из энергии сети электроснабжения и аккумулятора. Такую микросеть будем называть «базовой», поскольку она обладает всеми свойствами, указанными в определении [5]. Совершенно очевидно, что для обеспечения функционирования роутера микросети

во всём диапазоне его возможностей необходимо разработать алгоритм и программу оптимального управления накопителем электрической энергии.

Модель оптимального управления накопителем электрической энергии

Рассмотрим задачу оптимального управления накопителем электрической энергии в условиях дифференцированной тарификации её стоимости. Это значит, что на каждом временном интервале, соответствующем периоду фиксированной величины тарифа, необходимо осуществить выбор, использовать ли в данный момент электрическую энергию аккумуляторной батареи или сети электропитания, заряжать или не использовать батарею. Постановка и решение данной задачи были рассмотрены в [1].

В качестве численного метода оптимизации выбран метод роя частиц [4]. Он 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. 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 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.

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;
- $cons(cons_0, \dots, cons_n)$ – заданный 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, для всех $i = 0, n$:

- 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.

Оптимизация расписания работы накопителя ставится как задача нелинейного программирования:

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

$$\begin{cases} s_0(b_{in}) - x_0 \geq 0; \\ x_0 - d_0(b_{in}) \geq 0; \\ \left. \begin{matrix} x_i - d_i(x_0, \dots, x_{i-1}) \geq 0 \\ s_i(x_0, \dots, x_{i-1}) - x_i \geq 0 \end{matrix} \right| i = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (2)$$

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:

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

Заметим, что размерность задачи соответствует количеству временных интервалов, каждый из которых, в свою очередь, соответствует периоду фиксированной величины тарифа.

Приведенная постановка задачи с учётом особенностей предметной области, а также её решение методом роя частиц представляют собой модель оптимального управления накопителем электрической энергии. Данная модель реализована в программном обеспечении, формирующем команды, управляющие работой накопителя электрической энергии.

Задачи экспериментальной оценки и описание макета

Модель оптимального управления накопителем электрической энергии должна надёжно функционировать на реальном объекте в реальном масштабе времени. Поэтому актуальной является экспериментальная оценка модели с целью определения границ её функциональных возможностей в реальных условиях эксплуатации накопителя электрической энергии. Важнейшими выходными параметрами при оценке эффективности работы модели являются также её быстродействие и количество затрачиваемой памяти компьютера. Последнее обусловлено следующими факторами:

1. Количество реального потребления электрической энергии не всегда совпадает с запланированным объёмом. Это вызывает необходимость пересчёта и коррекции графика работы накопителя. Чем меньший процент времени относительно периода фиксированной величины тарифа будет занимать процесс пересчёта, тем эффективней будет работа системы. В настоящее время большинство энергетических компаний, осуществляющих продажу электрической энергии по дифференцируемой тарификации, в качестве фиксированного периода величины тарифа используют интервал, равный одному часу или 0,5 часа [2]. Ряд компаний уже осуществляют дифференцированную тарификацию с фиксированной величиной тарифа, равной 15 минутам, и эта тенденция набирает силу. В соответствии с практическими исследованиями, проводимыми в области прогнозирования электропотребления [3], отмечено, что при шаге дискретизации, меньшем, чем 15 минут, значительно повышается сложность прогнозирования потребления. В связи с этим в настоящее время пятнадцатиминутный интервал является минимальным значением периода фиксированной величины тарифа, и он берётся в качестве расчётной величины при оценке эффективности модели. В случае, если продолжительность пересчёта графика работы накопителя будет занимать более 15 минут, работа системы не будет соответствовать темпу реального времени. В идеале же процесс пересчёта графика накопителя не должен занимать более одной минуты. В таком случае удастся осуществить оптимальное управление в течение текущего периода фиксированной величины тарифа в соответствии со скорректированным графиком.

2. Всегда существует опасность, что ресурсов памяти сервера микросети не хватит для обработки поступающих данных. В каждый момент времени на сервере одновременно выполняются расчёты для всех пользователей микросети, что накладывает

ограничение на количество памяти, занимаемое каждым процессом.

Для экспериментальной оценки границ применимости модели оптимального управления накопителем электрической энергии реализован действующий макет базовой микросети. Он состоит из АС-DC-АС преобразователя электрической энергии, подключенного к сети электроснабжения с дискретной тарификацией энергии, и аккумуляторной батареи. Вычислительную сеть образуют программируемый логический контроллер с программным обеспечением «Умный дом» и сервер микросети, контролирующий состояние всей энергетической системы. Схема взаимодействия элементов макета представлена на рис. 1.

Рассмотренная в [1] методика формирования оптимального расписания работы накопителя реализована в программном обеспечении сервера микросети. Он формирует и передаёт график оптимальной работы накопителя контроллеру «Умный дом», который осуществляет управление АС-DC-АС-преобразователем. Преобразователь реализует режимы заряда и разряда аккумуляторной батареи согласно расписанию.

Расписание работы накопителя формируется на основе графика потребления электрической энергии, который составляется по специальной программе, исходя из заданных пользователем времени и продолжительности работы каждого потребителя. Программа загружается в контроллер «Умный дом». Включение и выключение потребителей электрической энергии осуществляется управляющими командами контроллера «Умный дом» посредством блока управления питанием.

В качестве АС-DC-АС преобразователя электрической энергии применена система бесперебойного питания СБП-5-230-50-1/1-МО-УХЛ4 с комплектом АГМ аккумуляторных батарей ёмкостью 65 А/ч. Основными требованиями, предъявляемыми при выборе преобразователя, были: наличие интерфейса управления RS485 или RS232, функции контроля количества энергии в накопителе, мгновенное переключение питания потребителей с накопителя на сеть электроснабжения и обратно. Контроллер «Умный дом» представлен программируемым логическим контроллером ПЛК100 производства компании «Овен». Блок управления питанием представляет собой управляемые реле с интерфейсом связи RS485. Сервер микросети представляет собой портативный компьютер, вычислительные способности которого ограничиваются 4 вычислительными процессорами и 1 ГБ оперативной памяти.

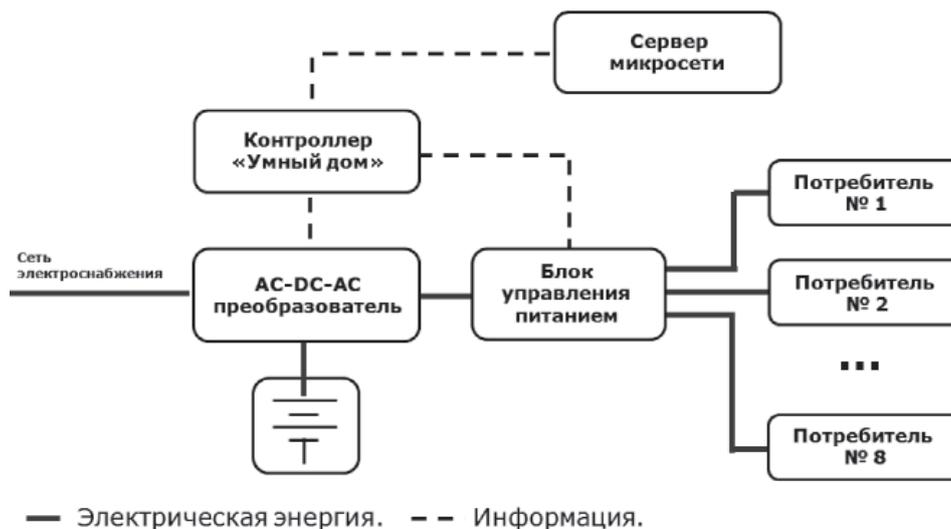


Рис. 1. Взаимодействие компонентов макета

План экспериментального исследования и его результаты

Исходные данные для проведения экспериментального исследования:

- период планирования – 24 часа;
- интервал фиксированной величины тарифа – 1 час;
- начальный заряд батареи $b_{in} = 0$ Вт·ч;
- максимальная емкость батареи $b_{max} = 14,3$ кВт·ч;
- максимальное количество электроэнергии, накапливаемой батареей за час $b_{ph} = 2,4$ кВт·ч;
- график потребления электрической энергии $cons(cons_1, \dots, cons_{24})$, представленный на рис. 2;

● график изменения тарифа на электрическую энергию $c(c_1, \dots, c_{24})$, представленный на рис. 3. За основу взята почасовая тарификация биржи электроэнергии Nord Pool Spot (NPS), при посредничестве которой торгуют между собой производители и покупатели электроэнергии северных стран (Финляндия, Эстония, Швеция, Норвегия и др.).

Экспериментальное исследование состояло из двух этапов. Задача первого этапа исследования заключалась в анализе функциональных возможностей модели оптимального управления накопителем для обеспечения экономии затрат на электрическую энергию. Вторым этапом эксперимента заключался в анализе эффективности программного обеспечения, реализующего модель управления.

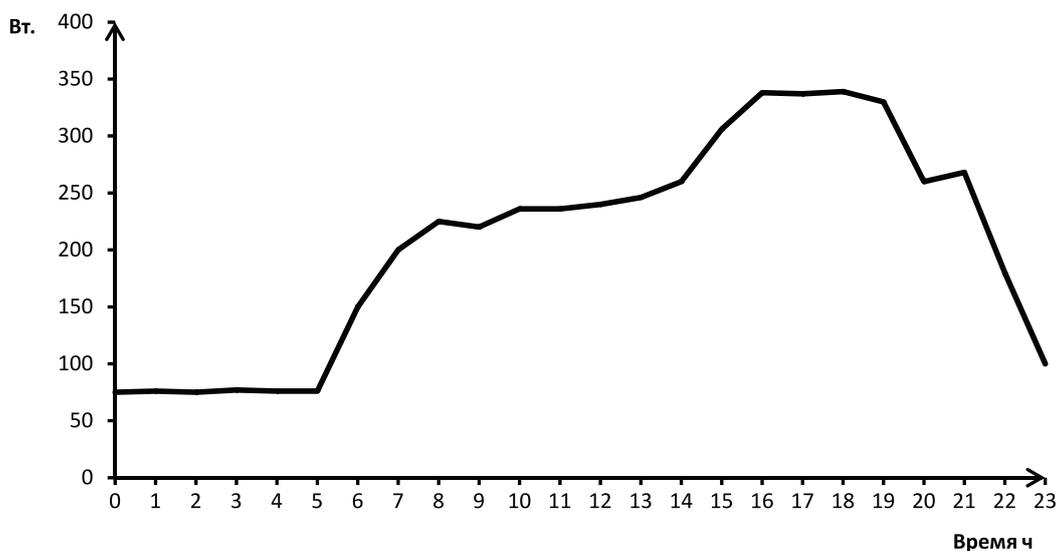


Рис. 2. График потребления электрической энергии

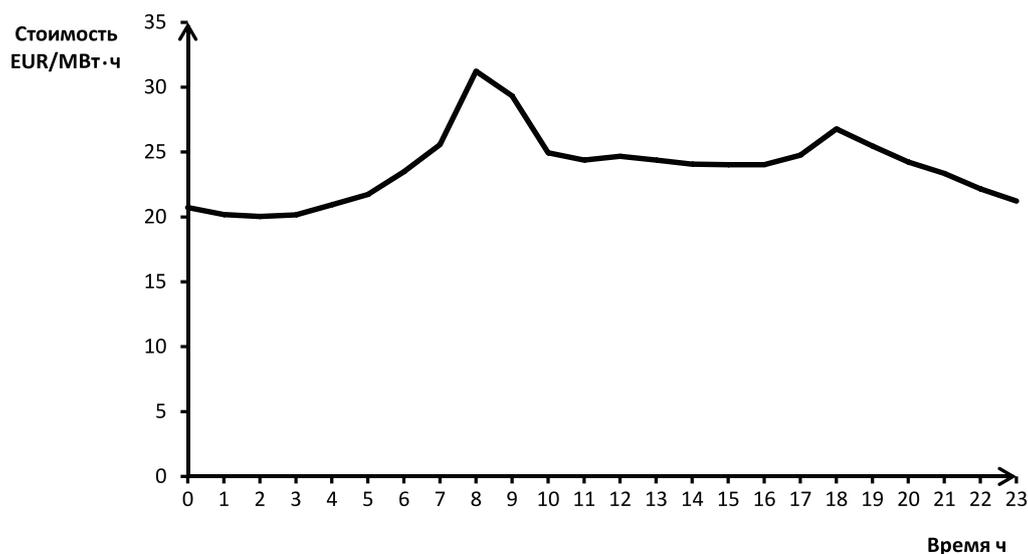


Рис. 3. График тарификации электрической энергии

При выполнении первого этапа были исследованы функциональные возможности для двух структур микросети. Первая структура состояла из двух источников электрической энергии: накопителя и центральной сети электроснабжения, т.е. представляла собой базовую микросеть. Во второй структуре была добавлена возможность покупки электрической энергии у других (восьми) участников микросети. Была проведена серия экспериментов, каждый из которых представлял собой следующую последовательность действий:

1. Рассчитывался график работы накопителя на предстоящий период планирования в соответствии с методом, рассмотренным в [1].

2. Для второй структуры на каждом временном интервале, соответствующем фиксированной величине тарифа, осуществлялся отбор предложений электрической энергии другими пользователями микросети, состоящей из нескольких базовых микросетей, подключенных к центральной сети электроснабжения 0,4 кВ. На основе анализа всех предложений формировался минимальный по стоимости «энергетический пакет», включающий, помимо энергии сети электроснабжения и аккумулятора, энергию, закупленную у других пользователей микросети. Предложения электрической энергии

пользователями микросети моделировались в режиме реального времени при помощи генератора случайных чисел.

3. Осуществлялась проверка соответствия реально затраченного количества электрической энергии установленному графику её потребления. Если реальное потребление превышало запланированную величину, обеспечивалось необходимое дополнительное количество электрической энергии из центральной сети электроснабжения. Если количество энергии, потраченной из накопителя, было меньше запланированного, производился перерасчет графика работы накопителя на предстоящий период.

Результаты обработки серии экспериментов для 10 случаев отражены в табл. 1. Каждый столбец таблицы соответствует одному эксперименту. По результатам каждого из экспериментов вычислялась экономия денежных средств путем вычета затрат на электрическую энергию в течение всего периода планирования из той суммы, которая была бы затрачена в случае, если бы питание нагрузок производилось только за счет центральной системы электроснабжения (при рассматриваемых начальных данных эта сумма равна 12,13 евроцентам). Результаты отличаются из-за наличия случайных величин при каждой реализации метода оптимизации.

Таблица 1

Результаты первого этапа экспериментального исследования

Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Экономия, % (структура 1)	19,2	18,9	22,3	20,4	19,5	23,6	19,7	22,3	20	18,4
Экономия, % (структура 2)	22,1	28,2	30,5	35,8	21,5	25	29,3	30,1	24,8	22,2

Из табл. 1 следует, что средняя экономия денежных средств в структуре с одним накопителем электрической энергии составила 20,43%, а с возможностью покупки энергии у других пользователей микросети – 29,95%. При увеличении количества экспериментов изменение средних значений незначительно (менее 0,5%), что делает нецелесообразным проведение большего числа экспериментов. Результаты позволяют сделать вывод об эффективности применённой модели оптимального управления накопителем электрической энергии в микросетях с интернет-подобной структурой, подключенных к центральной системе электроснабжения.

При выполнении второго этапа экспериментального исследования изучалось влияние быстродействия модели управления накопителем на функционирование микросети, а также производились измерения затрачиваемых ресурсов памяти.

Для оценки быстродействия и количества затрачиваемых ресурсов памяти была проведена серия вычислительных экспериментов, каждый из которых представлял собой решение задачи составления оптимального графика работы накопителя методом роя частиц при разных значениях количества частиц в рое и разной размерности задачи (т.е. разной величины периода планирования). Опытным путем было установлено, что для достижения результатов, близких к оптимальному, количество частиц в рое должно быть не менее 20. При значении количества частиц большем ста повышения точности результатов не зафиксировано. В связи с этим было решено провести серию из 9 экспериментов с количеством частиц равным 20, 50 и 100 для различных размерностей задачи. Результаты обработки серии экспериментов отражены в табл. 2.

На основе данных о количестве памяти, занимаемой процессом вычислений опти-

мального графика работы накопителя, можно сделать вывод о максимальном количестве одновременно запущенных процессов, т.е. о максимальном количестве обслуживаемых пользователей микросети, которое вычисляется по формуле

$$k = M/m, \quad (3)$$

где k – максимальное количество обслуживаемых пользователей микросети (соответствует 6-му столбцу табл. 2); M – количество доступной оперативной памяти (1 Гб); m – количество памяти, занимаемой одним процессом (соответствует 5 столбцу табл. 2).

Результаты серии эксперимента позволяют сделать вывод о недостатке метода решения рассматриваемой задачи, заключающегося в том, что в случаях, когда размерность задачи больше 8, время выполнения расчетов может достигать значений больших одного часа. Выявленный недостаток метода делает невозможным своевременный пересчет и коррекцию графика работы накопителя в случаях, когда значения реального потребления электрической энергии не совпадают с установленным графиком потребления (рис. 2), что снижает эффективность модели управления накопителем. В связи с этим была проведена серия экспериментов, заключающаяся в испытании модели управления при разбивке периода планирования на три интервала, каждый из которых равен восьми часам. Каждый из экспериментов представлял собой троекратное повторение эксперимента первого этапа с уменьшенным до 8 часов периодом планирования.

Проведено сравнение полученных результатов с результатами первого этапа экспериментальных исследований, где период планирования составлял 24 часа. Результаты обработки эксперимента отражены в табл. 3.

Таблица 2

Результаты вычислительного эксперимента

Номер эксперимента	Количество частиц	Размерность	Среднее время расчета (мин)	Память, Мб (m)	Максимальное количество пользователей (k)
1	2	3	4	5	6
1	20	8	0,34	1	1024
2	20	12	23,1	1	1024
3	20	24	32,2	1,5	682
4	50	8	0,45	2	512
5	50	12	35,5	2	512
6	50	24	60,1	2,5	409
7	100	8	0,63	4	256
8	100	12	44,3	4	256
9	100	24	71,2	4	256

Таблица 3

Результаты второго этапа экспериментального исследования

Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Экономия, % (структура 1)	22,2	28,9	22,3	25,4	23,5	27,6	29,7	30,3	28	29,7
Экономия, % (структура 2)	31,5	31,2	33,5	32,8	35,5	34	29,8	28,7	33,9	32,4

Средняя экономия денежных средств без возможности покупки электрической энергии у других пользователей составила 26,76% (на 6,33% больше, чем на первом этапе), а с возможностью покупки – 32,33% (на 2,38% больше, чем на первом этапе). Увеличение экономии связано с тем, что при отклонении реального потребления от запланированного производился своевременный пересчет графика работы накопителя в связи с тем, что быстродействие модели управления значительно увеличилось. Таким образом, для обеспечения максимально эффективного функционирования реализованного макета микросети необходимо осуществлять расчет оптимального графика работы накопителя со следующими параметрами: количество частиц в рое – 100; размерность задачи – 8. При этом в соответствии с результатами вычислительного эксперимента (табл. 2, строка 7) максимальное количество обслуживаемых пользователей микросети равно 256.

Выводы

1. Разработанная модель оптимального управления накопителем электри-

ческой энергии и разработанное на её основе программное обеспечение соответствуют требованиям реальной эксплуатации микросетей и могут применяться как готовые продукты при их реализации.

2. Опытным путем установлено, что для максимальной эффективности и быстродействия модели оптимального управления накопителем электрической энергии значение периода планирования должно составлять не более восьми временных интервалов.

Список литературы

1. Рожкова С.А., Белов В.Ф. Оптимизация расписания работы локального накопителя электрической энергии // Автоматизация процессов управления. – 2016. – № 1.
2. Borenstein S. Time-Varying Retail Electricity Prices: Theory and Practice // Griffin and Puller, eds., Electricity Deregulation: Choices and Challenges. – Chicago: University of Chicago Press, 2005. – P. 3–8.
3. Hledik R. The Top 10 Questions about Demand Charges // EUCI Residential Demand Charges Symposium. – 2015. – P. 13.
4. Kennedy J. and Eberhart R., Particle swarm optimization. – Proc. 1995 IEEE Int. Conf. Neural Netw., vol. 4.
5. US Department of Energy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://energy.gov/> (дата обращения: 03.04.16).