

УДК 621.316:004.942:519.853

## ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ГРАФИКА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В МИКРОСЕТЯХ

Рожкова С.А., Белов В.Ф., Буткина А.А.

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

В настоящее время во многих развитых странах, провозгласивших курс на возобновляемую энергетику, широко распространен переход на использование микросетей, функционирование которых реализуется по технологии Smart Grid. Одним из основных принципов работы микросетей является использование дифференцированной тарификации, при которой стоимость электрической энергии изменяется через определенный фиксированный промежуток времени или регулируется на основе механизма спроса-предложения, если в микросети реализована технология торговли частными запасами электроэнергии. В связи с этим все более актуальной становится задача создания устройств, способных управлять процессами покупки электрической энергии, а также разработка механизма принятия решений по ее оптимальному использованию с целью минимизации финансовых затрат потребителя. В данной работе приведена постановка задачи оптимизации потребления электрической энергии, решением которой является график работы электрических приборов в условиях почасовой дифференцированной тарификации. В качестве метода решения указанной задачи выбран метод роя частиц как наиболее подходящий для данного типа задач. В статье описано решение поставленной задачи каноническим методом роя частиц и его модификацией, предложенной авторами с целью адаптации рассматриваемого метода для решения целочисленных задач и повышения его быстродействия. Проведен сравнительный анализ канонического и модифицированного методов решения задачи на основе численного эксперимента. Сделан вывод об эффективности применения двух указанных методов для решения поставленной задачи, а также даны рекомендации по его дальнейшему усовершенствованию.

**Ключевые слова:** микросеть, Smart Grid, метод роя частиц, график потребления электрической энергии, дифференцированная тарификация

## OPTIMAL ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION SCHEDULING FOR MICROGRIDS

Rozhkova S.A., Belov V.F., Butkina A.A.

N.P. Ogarev Mordovia State University, Saransk, e-mail: rozhkova\_sa@mail.ru

Nowadays the usage of renewable energy is a priority for many developed countries. Therefore the using of micro grids realizing the Smart Grid technology is becoming more and more widespread. One of the basic features of micro grid is the time-varying pricing whereby the cost of electric power changes after a certain fixed period of time or adjusted on the basis of the demand-supply mechanism, in case the technology of trading using the private resources of electric power is implemented. In this regard the problem of developing the decision-making mechanism for optimal electric energy consumption scheduling in order to minimize the consumer spending is becoming increasingly urgent. In this paper, the formulation of the optimization problem of electric energy consumption scheduling is presented. The solution of this problem is an optimal work schedule of the electrical appliances under conditions of hourly varying pricing. Particle Swarm Optimization (PSO) is selected as a method of solving this problem because this method is the most suitable for problems of this type. The article describes the solution of the problem by the canonical PSO method and its modification that is proposed by the authors. The modification of the canonical PSO is needed in order to adapt this method to solve integer problems and to increase its performance. The article describes the solution of the problem by the canonical PSO method and its modification that is proposed by the authors. The modification of the canonical PSO is needed in order to adapt this method to solve integer problems and to increase its performance. A comparative analysis of canonical and modified methods of solving the problem on the basis of the results of numerical experiments is performed. The conclusion about effectiveness of these two methods to solve the problem as well as recommendations for its further improvements are given.

**Keywords:** micro grid, Smart Grid, Particle swarm optimization, electric energy consumption scheduling, time-varying pricing

Современный рынок электрической энергии характеризуется устойчивыми тенденциями к её удорожанию и переходом на дифференцированную тарификацию, при которой стоимость электрической энергии изменяется через определенный фиксированный промежуток времени (каждый час или, в ближайшем будущем, даже каждые 15 минут), который в дальнейшем будем называть *периодом фиксированной величины тарифа*. Эти тенденции обуславливают потребность в устройствах, способных управ-

лять процессами покупки, распределения и использования электрической энергии её конечными потребителями таким образом, чтобы суммарные затраты последних были минимальными. Особенно актуально это стоит в микросетях, функционирование которых реализуется по технологии Smart Grid. В них с учётом юридических аспектов гораздо легче, чем в коммерческих сетях, технически реализовать процессы торговли электрической энергией по свободно формируемым ценам.

Важнейшим этапом создания подобного рода устройств является разработка механизма принятия решений. Во-первых, он позволит потребителям электрической энергии формировать *график потребления*, то есть определять, как должен изменяться уровень потребления энергетических услуг в течение *периода планирования*. Во-вторых, этот механизм должен осуществлять планирование работы электрических приборов на основе заранее сформированного графика потребления с учетом текущих тарифов на электрическую энергию так, чтобы финансовые затраты со стороны потребителя были минимальными.

Ключевой задачей при разработке такого механизма является задача оптимизации, решение которой позволит подобрать такой график работы электрических приборов, при котором затраты потребителя будут минимальными.

При решении данной задачи также важно учитывать качество потребляемой электрической энергии. Основным показателем, характеризующим качество электрической энергии, является коэффициент несинусоидальности напряжения THD [1].

Отклонение THD от нормированных значений проявляется в виде экономического ущерба у потребителей электрической энергии. Данный ущерб имеет электромагнитную и технологическую составляющие. Электромагнитная составляющая определяется в основном дополнительными потерями активной мощности и энергии и сокращением ресурса электрооборудования, например ввиду ускоренного старения изоляции. Технологическая составляющая ущерба связана с увеличением длительности производственного процесса, со снижением производительности электрооборудования и, следовательно, с увеличением удельного электропотребления на единицу произведенной продукции.

Целевая функция, отражающая финансовые затраты потребителя, имеет вид

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{j=1}^{m_i} U_i^j \cdot c_i^j \cdot \lambda(x_i + j - 1) \right] \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$0 < x_i < 23, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Решением задачи является оптимальный график работы электрических приборов (в рассматриваемом случае – почасовой), представленный вектором  $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

Наиболее подходящим методом решения рассмотренной задачи оптимизации является метод роя частиц (Particle Swarm Optimization) [3, 4].

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{j=1}^{m_i} U_i^j \cdot c_i^j \cdot \lambda(x_i + j - 1) \right], \quad (1)$$

где  $n$  – количество электрических приборов;  $m_i$  – время работы  $i$ -го прибора (количество часов);  $U_i^j$  – количество энергии, потребляемой  $i$ -м прибором за  $j$ -й час работы, т.е. каждому электрическому прибору соответствует вектор  $U_i(U_i^1, U_i^2, \dots, U_i^{m_i})$ ;  $x_i$  – время (час) начала работы  $i$ -го прибора, причем  $0 < x_i < 23$ ,  $i = \overline{1, n}$ ;  $\lambda(t)$  – тариф на электрическую энергию,  $0 < t < 23$  (в нашем случае  $t = x_i + j - 1$  соответствует  $j$ -му часу работы электрического прибора при условии, что данный прибор начал работать в момент времени  $x_i$ );  $c_i^j$  – коэффициент, учитывающий влияние качества потребляемой электрической энергии на потребляемую мощность  $i$ -м электрическим прибором за  $j$ -й час работы, т.е. каждому электрическому прибору соответствует вектор  $c_i(c_i^1, c_i^2, \dots, c_i^{m_i})$ .

Дискретность во времени коэффициента  $c_i^j$  хорошо согласуется с требованиями Открытого протокола Smart Grid (OSGP), по которому требуется записывать в память микроконтроллера все отклонения THD от нормы [1]. В общем случае  $c_i^j = f(THD_i^j)$ . Существование данной функции является очевидным, но ее конкретный вид зависит от многих факторов, трудно поддающихся формализации. Поэтому на данном этапе для определения  $c_i^j$  следует применять экспертные методы анализа или использовать полные математические модели микро Smart Grid для получения качественного статистического материала [2].

Таким образом, для минимизации затрат потребителя необходимо решить следующую задачу оптимизации:

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 ча-

стицы 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

$$v_{i,k}^{t+1} = \omega \cdot v_{i,k}^t + c_1 \cdot r_1(t) \cdot (p_{Gb,i}^t - p_{i,k}^t) + c_2 \cdot r_2(t) \cdot (p_{Pb,i}^t - p_{i,k}^t); \quad (4)$$

$$p_{i,k}^{t+1} = p_{i,k}^t + v_{i,k}^{t+1}, \quad (5)$$

где  $P(p_{1,k}^t, \dots, p_{n,k}^t)$  и  $V(v_{1,k}^t, \dots, v_{n,k}^t)$  – 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  $[0, 1]$ ;  $P_{Gb,i}^t(t)$  – лучшая известная позиция, найденная на данный момент среди всех частиц в рое;  $P_{Pb,i}^t(t)$  – лучшая

среди всех частиц. При этом под наилучшей позицией понимается позиция, соответствующая минимальному (максимальному) значению целевой функции.

Канонический вариант метода описывает движение частиц следующим образом [5]:

позиция  $i$ -й частицы, найденная ею на данный момент.

В качестве примера было рассмотрено численное решение задачи (2)–(3) для двух переменных со следующими параметрами: количество частиц в рое – 50; время работы первого прибора – 2 часа время работы второго прибора – 3 часа;  $c_1 = c_2 = 1,4962$ ;  $\omega = 0,7298$ .

Тариф на электрическую энергию приведен в табл. 1.

Таблица 1

Тариф на электрическую энергию

Время суток (ч)	0:00–1:00	1:00–8:00	8:00–9:00	9:00–14:00	14:00–21:00	21:00–23:00
Стоимость электрической энергии (\$/кВт·ч)	0,0814	0,1408	0,0814	0,1408	0,3564	0,1408

Допустим, с учетом коэффициентов  $c_i^j$ , первый прибор потребляет 1 и 2 кВт·ч за первый и второй часы работы соответственно; второй прибор – 2 кВт·ч за первый час и по 1 кВт·ч во второй в третий часы работы. Таким образом, для того, чтобы минимизировать затраты, необходимо первый

прибор включить в 07:00, а второй прибор – в 00:00 или в 08:00.

Вычисления производились с помощью пакета MATLAB R2011b. Результаты десяти численных экспериментов и график целевой функции приведены ниже.

Таблица 2

Результаты численного эксперимента

Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Результат $[x_1, x_2]$	[7, 8]	[7, 8]	[7, 8]	[7, 8]	[7, 0]	[7, 8]	[7, 8]	[7, 0]	[7, 0]	[7, 0]
Число итераций	105	827	1221	2122	121	104	774	125	270	288

Таким образом, применение метода роя частиц позволяет успешно решать задачи оптимизации, связанные с нахождением наилучших режимов работы электрических приборов с целью минимизации затрат потребителя.

С целью адаптации метода для решения целочисленных задач и повышения его быстродействия были внесены следующие изменения:

– значение скорости на каждом временном шаге округлялось до наименьшего целого;

– если позиция частицы осталась той же, что и на предыдущем шаге (т.е. скорость  $i$ -й частицы оказывалась равной нулю), то

значение скорости определялось следующим образом:

$$v_i^{t+1} = \text{sign}(v_{\max}^{t+1}), \quad (6)$$

где  $v_{\max}^{t+1}$  – максимальная по абсолютному значению скорость среди всех частиц на данном временном шаге.

Для проведения сравнительного анализа канонического и модифицированного методов решения задачи был проведен численный эксперимент, в ходе которого рассматривалось численное решение задачи (2)–(3) для двух переменных. Решением данной задачи является вектор  $x$ ,

принимающий значения [7, 8] или [7, 0]. В результате решения задачи каноническим и модифицированным методами были получены следующие результаты:

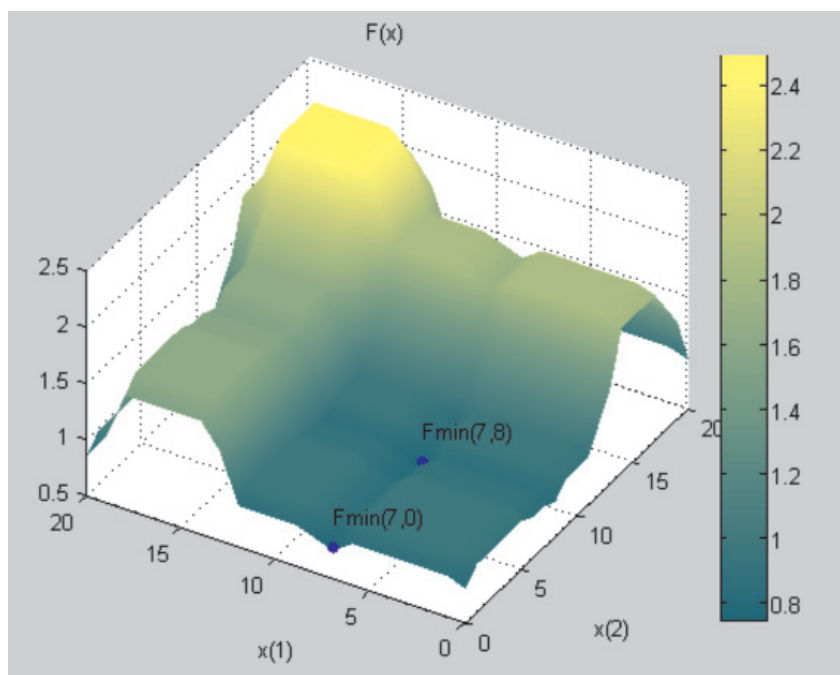


График целевой функции

Таблица 3

Номер итерации	Канонический метод «роя частиц»		Модифицированный метод «роя частиц»	
	Результат $[x_1 \ x_2]$	Кол-во итераций	Результат $[x_1 \ x_2]$	Кол-во итераций
1	2	3	4	5
1	[7 0]	701	[7 8]	20
2	[7 8]	252	[6 0]	5
3	[7 8]	149	[7 8]	12
4	[7 8]	677	[7 0]	13
5	[7 8]	537	[7 8]	21
6	[7 8]	86	[7 8]	27
7	[7 8]	96	[6 0]	6
8	[7 8]	526	[7 8]	24
9	[7 8]	174	[7 8]	103
10	[0 0]	200	[7 8]	21
11	[7 8]	170	[6 0]	17
12	[7 8]	788	[7 8]	30
13	[7 8]	732	[7 0]	23
14	[7 8]	2117	[7 0]	18
15	[7 8]	345	[7 0]	8
16	[7 8]	131	[7 8]	37
17	[7 0]	1542	[0 0]	3
18	[7 0]	107	[6 5]	6
19	[7 8]	336	[7 0]	4
20	[7 8]	152	[7 8]	25
<b>Среднее количество итераций</b>				
<b>491</b>			<b>21</b>	

Таким образом, тестирование модифицированного метода «роя частиц» для решения целочисленной задачи оптимизации графика потребления электрической энергии позволяет сделать вывод о существенном преимуществе данного метода в скорости по сравнению с каноническим.

Однако точность вычислений уступает каноническому методу в связи с высокой вероятностью сходимости частиц к локальному экстремуму, что позволяет сделать вывод о необходимости дальнейшего усовершенствования метода для исключения возможности сходимости частиц к локальному экстремуму, в частности применения метода «растяжения» (stretching technique) [6].

#### Список литературы

1. Белов В.Ф., Буткина А.А., Шамаев А.В. Метод покрытия графа эквивалентной схемы преобразовательной системы совокупностью M-элементов // XLI Огаревские чтения: материалы науч. конф.: в 3 ч. Ч 2: Естественные науки. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – С. 237–243.
2. Kennedy J. and Eberhart R., Particle swarm optimization // Proc. 1995 IEEE Int. Conf. Neural Netw. – Vol. 4.
3. Laskari E.C., Parsopoulos K.E., Vrahatis M.N., Particle Swarm Optimization for Integer Programming – Department of Mathematics, University of Patras Artificial Intelligence Research Center (UPAIRC), GR-261 10 Patras, Greece, 2002.
4. Open Smart Grid Protocol (OSGP), ETSI GS OSG 001 V1.1.1 (2012-01), 2012.
5. 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
6. Pedrasa M.A., Spooner T.D., and MacGill I.F., An energy service decision-support tool for optimal energy ser-

vices acquisition – Centre for Energy and Environmental Markets, Apr. 2010.

#### References

1. Belov V.F., Butkina A.A., Shamaev A.V. Metod pokrytija grafa jekvivalentnoj shemy preobrazovatel'noj sistemy sovokupnost'ju M-jelementov: XLI Ogarevskie chtenija: materialy nauch. konf.: v 3 ch. Ch 2: Estestvennye nauki («Covering method of equivalent circuit graph of conversion system by set of B-elements»: Proceedings XLI Ogarev reading. Part 2: Science). Saransk, 2013, pp. 237–243.
2. Kennedy J. and Eberhart R., Particle swarm optimization, – Proc. 1995 IEEE Int. Conf. Neural Netw., vol. 4.
3. Laskari E.C., Parsopoulos K.E. and Vrahatis M.N., Particle Swarm Optimization for Integer Programming – Department of Mathematics, University of Patras Artificial Intelligence Research Center (UPAIRC), GR-261 10 Patras, Greece, 2002.
4. Open Smart Grid Protocol (OSGP), ETSI GS OSG 001 V1.1.1 (2012-01), 2012.
5. 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.
6. Pedrasa M.A., Spooner T.D., and MacGill I.F., An energy service decision-support tool for optimal energy services acquisition – Centre for Energy and Environmental Markets, Apr. 2010.

#### Рецензенты:

Сергеев В.А., д.т.н., профессор, директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Ульяновск;

Белей В.Ф., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электрооборудования судов и электроэнергетики, ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет», г. Калининград.

Работа поступила в редакцию 15.09.2014.