

УДК 004.942

**А.В. Кычкин, А.В. Чудинов**Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия**ЭВРИСТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ МОЩНОСТИ  
В АКТИВНО-АДАПТИВНОЙ СЕТИ**

Предложен эвристический алгоритм оптимизации режимов распределенной генерации энергосистемы на примере локального сегмента активно-адаптивной сети, состоящей из четырех генераторов и шести потребителей электроэнергии. В локальной активно-адаптивной сети определены условия распределения электроэнергии от генераторов к потребителям, а также поставлена и решена задача оптимизации распределения полной мощности с помощью генетического алгоритма. Заданы случайные значения параметров передачи мощности от генераторов к потребителям, образующие популяцию – набор особей, характеризующихся хромосомами, представляющими собой числовой вектор, отвечающий параметрам мощности. Каждая особь представляет собой индивидуальное решение оптимизационной задачи. Далее по алгоритму значения генерации изменяются, достигая наибольшей скорости роста функции полезности. Для предотвращения остановки алгоритма при достижении локального максимума на каждом шаге производится мутация – случайное изменение составной части хромосомы. Произведено сравнение полученного решения с решением несбалансированной транспортной задачи, в результате чего установлено, что генетический алгоритм предложенной реализации дает достаточно точное решение по оптимизации перетоков мощности, обеспечивает многокритериальную оптимизацию и функционально сложные ограничения на генерацию и потребления электрической энергии. Экспериментальные исследования основаны на результатах полунатурного моделирования локальной активно-адаптивной сети, реализованной на базе лабораторного оборудования кафедры МСА ПНИПУ. Проведенная оптимизация по полной мощности на стенде полунатурного моделирования локальной активно-адаптивной сети позволит рационально распределить потребление электроэнергии с минимальными потерями. Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук, МК–5279.2014.8 «Синтез эффективных технологий удаленного мониторинга и управления состоянием интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью».

**Ключевые слова:** MicroGrid, локальная активно-адаптивная электрическая сеть, генетический алгоритм, транспортная задача, целевая функция, оптимизации потоков мощности.

**A.V. Kichkin, A.V. Chudinov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**HEURISTIC ALGORITHM FOR THE MICROGRID  
POWER OPTIMIZATION**

The paper proposes an evolution heuristic algorithm for optimization of distributed generation power system. The local segment of active – adaptive network consisting of four generators and six consumers is used as an example. In a local active-adaptive network conditions defined distribution of electricity from generators to consumers, as well as solve the problem of optimizing the distribution of

the total power with the help of genetic algorithm. Random values of transmission power from generators to consumers, forming the population – a set of individuals characterized by chromosomes, is a numeric vector corresponding to the parameters of power are given. Each individual is an individual solution to the optimization problem. Next, the algorithm generating values change, achieving the highest growth rate of the utility function. In order to prevent the algorithm stops when it reaches a local maximum at each step mutations – random changes in part of the chromosome. A comparison of the solution with the solution unbalanced transportation problem. Experimental studies are based on the HIL local active-adaptive network, realized on the basis of laboratory equipment the department Micro-processor Means of Automatization department of Perm National Research Polytechnic University. The work was performed as part of the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – candidates, MK-5279.2014.8 "Synthesis of efficient technologies for remote monitoring and managing of intellectual power system with active-adaptive network".

**Keywords:** MicroGrid, local active-adaptive electric network, genetic algorithm, the transportation problem, the objective function, power flows optimization.

**Введение.** Обеспечение надежного электроснабжения потребителей в сегментах электроэнергетических сетей при заданных показателях качества электрической энергии и минимальных эксплуатационных затратах является ключевой задачей оптимального управления нормальными режимами работы. Следует отметить, что многокритериальная оптимизация режима генерации для распределенных интеллектуальных систем электроснабжения на примере активно-адаптивной сети (ААС) заключается в формировании оптимальных с точки зрения комплекса установленных критериев минимизации потерь, минимизации эксплуатационных затрат, максимизации качества электроэнергии и других при учете технических ограничений на генерацию, транспорт и потребление энергии [1, 2]. Эта задача может быть решена с применением аппарата линейного и нелинейного программирования с ограничениями в виде уравнений установленного режима и нелинейных неравенств. Однако большое число узлов, сложные функциональные и нефункциональные зависимости, временные перерывы в работе оборудования и в целом случайный характер поведения ААС усложняют постановку задачи линейного и нелинейного программирования. Это, в свою очередь, обуславливает применение эвристических алгоритмов многокритериальной оптимизации [3, 4].

Перспективным методом эвристического поиска экономичного допустимого режима работы ААС, отвечающего условиям надежности электроснабжения и качества электроэнергии, представляется метод эволюционной оптимизации на основе генетического алгоритма [5]. В этом случае комплексным критерием может выступать функция полезности как значение суммарных издержек и потерь при заданной в исследуемый момент времени нагрузке потребителей. Неизвестными величинами выступают значения мощностей элементов распределенной генерации.

**Постановка задачи оптимизации мощности на полунатурной модели локальной активно-адаптивной сети.** Задачу по оптимизации с использованием генетического алгоритма исследуем на полунатурной модели локальной ААС [6], в которой имеется 4 генератора альтернативной энергии [7]:  $G_1$ ,  $G_3$  – ветряные генераторы с асинхронным двигателем,  $G_2$ ,  $G_4$  – батареи солнечных элементов,  $G_5$  – внешняя сеть; 6 потребителей (бытовые потребители  $C_1$ ,  $C_3$ ,  $C_5$ , электроприводы  $C_2$ ,  $C_4$ ,  $C_6$ ). При передаче электроэнергии на расстояния возникают потери, определяемые расстоянием от генератора до потребителя. Схема для реализации оптимизации мощности в виде комплекса полунатурной имитации приведена на рис. 1.

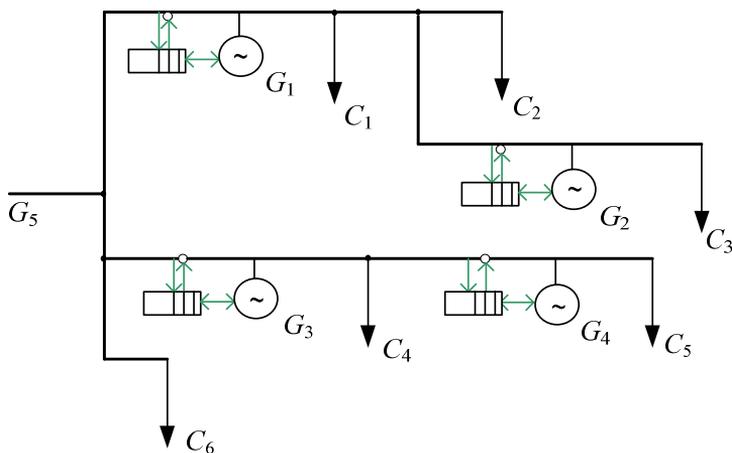


Рис. 1. Схема локального сегмента ААС

В зависимости от нагрузки система имитации ААС распределяет требуемую мощность, задав приоритет генератора, определяемый близостью до потребителя. Если какой-либо генератор не имеет достаточной мощности, то система имитации дополняет требуемую энергию от следующего ближайшего генератора. Во избежание потерь энергии во время передачи по высоковольтным линиям сеть занимает последнее место в приоритетном порядке. Если суммарная мощность всех подключенных генераторов недостаточна для потребителей, то система имитации дополняет энергию от внешней сети электроснабжения.

С учетом особенностей полунатурной модели локального сегмента ААС потребители получают электроэнергию от ближайшего по размещению (логически) генератора. Мощность генераторов в рамках

заданного режима полунатурного моделирования постоянна и характеризуется математическим законом генератора. Используются следующие ограничения генерации, заданные системой равенств:

$$x_{11} + x_{21} + x_{31} + x_{41} + x_{51} + x_{61} = 10,09 \text{ кВт};$$

$$x_{12} + x_{22} + x_{32} + x_{42} + x_{52} + x_{62} = 5,4 \text{ кВт};$$

$$x_{13} + x_{23} + x_{33} + x_{43} + x_{53} + x_{63} = 8,28 \text{ кВт};$$

$$x_{14} + x_{24} + x_{34} + x_{44} + x_{54} + x_{64} = 7,13 \text{ кВт},$$

где,  $x_{ij}$  – значение мощности, передаваемое  $i$ -му потребителю от  $j$ -го генератора.

Модель нагрузки учитывает случайный характер потребления, величины нагрузки могут изменяться в соответствии с алгоритмом имитации. Максимальные значения нагрузки представлены в ограничениях по потреблению системой неравенств:

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} \leq 8,82 \text{ кВт};$$

$$x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} \leq 3,31 \text{ кВт};$$

$$x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} \leq 1,71 \text{ кВт};$$

$$x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{44} \leq 13,8 \text{ кВт};$$

$$x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} \leq 2,28 \text{ кВт},$$

где,  $x_{ij}$  – значение мощности, передаваемое  $i$ -му потребителю от  $j$ -го генератора.

**Оптимизация мощности в ААС на основе генетического алгоритма.** Генетический алгоритм представляет собой эвристический метод решения оптимизационной задачи для ААС высокой вычислительной сложности NP класса. Вместо полного перебора вариантов распределенной генерации, занимающего существенное время, а при больших масштабах ААС это технически невозможно, генетический алгоритм может дать значительно более быстрое, но недостаточно обоснованное теоретически, решение. Практика показывает, что в большинстве случаев эвристические методы дают достаточно хорошее решение при анализе состояния сложных распределенных систем, не имеющих точного математического описания [8].

Генетический алгоритм оптимизации мощности в ААС представляет собой совокупность переборного и градиентного методов, а именно переборный метод реализуют скрещивание и мутации, а градиентный спуск реализуется на базе отбора лучших решений [9].

Для оптимизации распределения мощности в ААС зададим случайные значения параметров передачи мощности от генераторов к потребителям, образующие популяцию – набор особей, характеризующихся хромосомами, представляющими собой числовой вектор, отвечающий параметрам мощности. Каждая особь в таком случае будет представлять собой индивидуальное решение оптимизационной задачи. Далее по алгоритму значения генерации будут изменяться, достигая наибольшей скорости роста функции полезности. Для предотвращения остановки алгоритма при достижении локального максимума на каждом шаге производится мутация – случайное изменение части генов – составной части хромосомы. Такой градиентный метод обеспечивает достаточно быстрое решение, но не гарантирует его оптимальности.

Работа генетического алгоритма оптимизации распределения мощности в ААС заключается в этом случае в отборе решений, более приспособленных по целевой функции потерь. В процессе работы алгоритма рассматривается множество поколений, сменяющих друг друга. Полученная среда будет подчиняться законам эволюции, а функция потерь особей постепенно уменьшаться, так как задействуются естественный отбор и генетическое наследование. Близкий к оптимальному ответ будет получен после длительной эволюции как наиболее приспособленная особь.

Выделим основные шаги генетического алгоритма:

1. Создание новой популяции – множество значений переменных  $X_{ij}$ .
2. Размножение, включающее в себя выбор двух родительских особей согласно заданному алгоритму, скрещивание и оценка приспособленности.
3. Мутация, в ходе которой осуществляется изменение хромосом в соответствии с заранее определенными операциями (комбинирование перетоков мощности).
4. Отбор определённой части особей, характеризующихся допустимыми функциями полезности (допустимые перетоки мощности).

Проведение численных расчетов реализовано на базе программы Easy NP, позволяющей встраивать пользовательские тексты программ.

Объявлены 24 переменные, передаваемые от генераторов к потребителям мощностей  $x_1-x_{24}$ , принимающие значения в диапазоне 0–10 000 кВт, что удовлетворяет условиям задачи. Заданы ограничения  $C_1-C_6$  на потребление и  $G_1-G_4$  на генерацию электрической

энергии, которым переменные  $x_1-x_{24}$  должны удовлетворять в ходе этапа отбора особей. Целевая функция представляет собой сумму произведений потерь на соответствующий коэффициент потерь для заданных участков ААС.

Таблица 1

Обозначения неизвестных величин потоков мощности в ААС

Генераторы	Потребители						Суммарная генерация, кВт
	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	
$G_1$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	10,09
$G_2$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$	5,4
$G_3$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$	$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	8,28
$G_4$	$x_{19}$	$x_{20}$	$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{24}$	7,13
Суммарное потребление, кВт	8,82	3,31	1,71	13,8	2,28	1,71	

В решение задачи генетическим алгоритмом генераторы могут производить мощность меньше либо равную той, которая указана в табл. 1, а потребители потребляют ровно столько, сколько указано в таблице. В табл. 2 приведены ограничения по потреблению и генерации, а также коэффициенты потерь при передаче единицы электроэнергии, заданные по условиям географического (логически) размещения объектов ААС (рис. 1).

Таблица 2

Матрица коэффициентов потерь

Генераторы	Потребители					
	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
$G_1$	0,05	0,07	0,07	0,22	0,27	0,33
$G_2$	0,06	0,04	0,3	0,34	0,4	0,42
$G_3$	0,26	0,35	0,25	0,03	0,08	0,1
$G_4$	0,3	0,4	0,35	0,07	0,03	0,16

С учетом приведенных обозначений неизвестных, введенных ограничений и целевой функции в среде Easy NP был разработан программный код, обеспечивающий выполнение эволюционного процесса поиска решения.

Целевая функция  $F(x)$  была рассчитана согласно выражению:  

$$F(x) = 0.05x_{11} + 0.07x_{12} + 0.07x_{13} + 0.22x_{14} + 0.27x_{15} + 0.33x_{16} + 0.06x_{21} + 0.04x_{22} + 0.3x_{23} + 0.34x_{24} + 0.4x_{25} + 0.42x_{26} + 0.26x_{31} + 0.35x_{32} + 0.25x_{33} + 0.03x_{34} + 0.08x_{35} + 0.1x_{36} + 0.3x_{41} + 0.4x_{42} + 0.35x_{43} + 0.07x_{44} + 0.03x_{45} + 0.16x_{46} \rightarrow \min$$

В результате решения оптимизационной задачи распределения мощности в ААС получены числовые результаты, значения которых приведены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение решений транспортной задачи и генетического алгоритма оптимизации распределения мощности в ААС

№ п/п	Обозначение параметра для транспортной задачи	Обозначение параметра для генетического алгоритма	Решение транспортной задачи, кВт	Решение генетического алгоритма, кВт	$\Delta$ , кВт
1	$x_1$	$x_{11}$	6,73	6,71	0,02
2	$x_2$	$x_{21}$	0	0,02	0,02
3	$x_3$	$x_{31}$	1,71	1,69	0,02
4	$x_4$	$x_{41}$	1,65	1,65	0
5	$x_5$	$x_{51}$	0	0,02	0,02
6	$x_6$	$x_{61}$	0	0	0
7	$x_7$	$x_{21}$	2,09	2,09	0
8	$x_8$	$x_{22}$	3,31	3,29	0,02
9	$x_9$	$x_{23}$	0	0,02	0,02
10	$x_{10}$	$x_{24}$	0	0	0
11	$x_{11}$	$x_{25}$	0	0	0
12	$x_{12}$	$x_{26}$	0	0	0
13	$x_{13}$	$x_{31}$	0	0	0
14	$x_{14}$	$x_{32}$	0	0	0
15	$x_{15}$	$x_{33}$	0	0	0
16	$x_{16}$	$x_{34}$	7,3	7,3	0
17	$x_{17}$	$x_{35}$	0	0	0
18	$x_{18}$	$x_{36}$	0,98	0,98	0
19	$x_{19}$	$x_{41}$	0	0,02	0,02
20	$x_{20}$	$x_{42}$	0	0	0
21	$x_{21}$	$x_{43}$	0	0	0
22	$x_{22}$	$x_{44}$	4,85	4,85	0
23	$x_{23}$	$x_{45}$	2,28	2,26	0,02
24	$x_{24}$	$x_{46}$	0	0	0
<b>F(x)</b>			1,8019	1,8003	0,0016

Также была проведена сравнительная оценка полученного результата с решением оптимизационной задачи для заданных условий на основе транспортной задачи [10]. Результат сравнительного анализа решения транспортной задачи и задачи оптимизации на основе генетического алгоритма приведен на рис. 2.

Абсолютное отклонение  $\Delta$  рассчитано по формуле  $\Delta = |x_k - x_{ij}|$  для соответствующих друг другу параметров распределяемой мощности при оптимизации с использованием транспортной задачи и генетического алгоритма. Абсолютное отклонение величиной 0,02 кВт постоянно и обуславливается рядом упрощений, положенным в основу эвристического алгоритма, а также несовершенством принципа действия и неточностью расчетов программы.

По результатам работы генетического алгоритма видно, что потребность 6-го потребителя остается неудовлетворенной на 0,73 кВт. Суммарная абсолютная разница в решении по распределении мощностей для ААС равна 0,16 кВт, что составляет 0,52 % от суммарной генерации. Значение целевой функции отличается на 0,09 %. Сравнивая решения по оптимизации мощности двумя способами, приходим к выводу, что генетический алгоритм дает хорошее решение с учетом заданных условий эволюционной имитации.

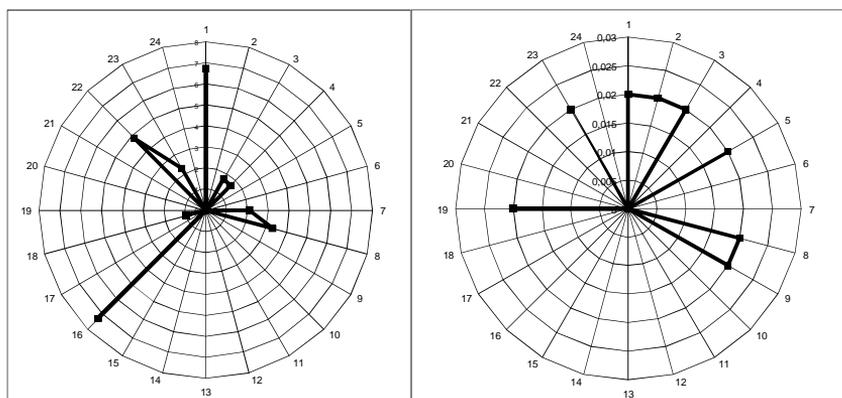


Рис. 2. Круговые диаграммы, иллюстрирующие результаты распределения мощностей (слева) и абсолютные отклонения значений (справа) по направлениям  $x_1...x_{24}$

**Закключение.** Генетический алгоритм дает достаточно точное решение по оптимизации перетоков мощности в сегменте ААС, кроме этого алгоритм потенциально обеспечивает многокритериальную оптимизации и функционально сложные ограничения.

Проведённый расчёт оптимизации по полной мощности на стенде полунатурного моделирования локальной ААС позволит правильно распределить потребление электроэнергии с минимальными потерями. После выполненных экспериментов можно заключить, что оптимизация по полной мощности в рамках полунатурной модели ААС повысила эффективность работы моделируемой сети, распределив наиболее оптимально потоки мощности, снизив процент потерь.

### **Библиографический список**

1. Ледин С.С. Интеллектуальные сети SmartGrid – будущее российской энергетики (ЗАО ИТФ «Системы и технологии») // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2010. – № 11(16). – С. 4–8.
2. Smart Energy Management System for Optimal Microgrid Economic Operation / C. Chen, S. Duan, T. Cai, B. Liu, G. Hu // Renewable Power Generation, IET. – May, 2011. – Vol. 5, № 3. – P. 258–267.
3. Гамм А.З., Колосок Н.Н., Заика Р.А. Робастные методы оценивания состояния электроэнергетических систем и их реализация с помощью генетических алгоритмов // Электричество. – 2005. – № 10. – С. 2–8.
4. Тарасенко В.В. Генетический алгоритм выбора распределённой генерации // Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика. – 2010. – Вып. 13. – №14(190). – С. 15–19.
5. Raj Christofer Asir, Mohan M.R. An evolutionary programming based simulated annealing method for solving the unit commitment problem // Electrical Power and Energy System. – 2007. – № 29.
6. Полунатурное моделирование активно-адаптивной электрической сети / А.Б. Петроченков, Т. Франк, А.В. Ромодин, А.В. Кычкин // Электротехника. – 2013. – № 11. – С. 60–63.
7. Liserre M., Sauter T., Hung J.Y. Future energy systems: Integrating renewable energy sources into the smart power grid through industrial electronics // IEEE Industrial Electronics Magazine: – March, 2010. – Vol. 4, Is. 1. – P. 18–37. – URL: <http://dx.doi.org/10.1109/MIE.2010.935861>
8. Кычкин А.В. Интеллектуальная информационно-диагностическая система для исследований кровеносных сосудов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2013. – № 3. – С. 114–123.
9. Гладков Л.А. Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2006.

10. Кычкин А.В., Чудинов А.В. Оптимизация распределения мощности в полунатурной модели локальной активно-адаптивной электроэнергетической сети // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 3 (11). – С. 81–93.

### References

1. Ledin S.S. Intellektual'nye seti SmartGrid – budushchee rossiiskoi energetiki (ZAO ITF «Sistemy i tekhnologii») [SmartGrid Intelligent networks – the future of the Russian power industry (LC ITF "Systems and Technologies")]. *Avtomatizatsiia i IT v energetike*, 2010, no. 11(16), pp. 4-8.

2. Chen C., Duan S., Cai T., Liu B., Hu G. Smart Energy Management System for Optimal Microgrid Economic Operation. *Renewable Power Generation, IET*, 2011, May, vol. 5, no. 3. pp. 258-267.

3. Gamm A.Z., Kolosok H.H., Zaika P.A. Robastnye metody otsenivaniia sostoianiia elektroenergeticheskikh sistem i ikh realizatsiia s pomoshch'iu geneticheskikh algoritmov [Robust methods for estimating the state of electric power systems and their implementation by means of genetic algorithms]. *Elektrichestvo*, 2005, no. 10, pp. 2-8.

4. Tarasenko V.V. Geneticheskii algoritm vybora raspredelennoi generatsii [Genetic selection algorithm of distributed generation]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2010, iss. 13, no. 14(190), pp. 15-19.

5. Raj Christober Asir, Mohan M.R. An evolutionary programming based simulated annealing method for solving the unit commitment problem. *Electrical Power and Energy System*, 2007, no. 29.

6. Petrochenkov A.B., Frank T., Romodin A.V., Kychkin A.V. Polunaturnoe modelirovanie aktivno-adaptivnoi elektricheskoi seti [Half-sized modeling of active-adaptive electric grid]. *Elektrotekhnika*, 2013, no. 11, pp. 60-63.

7. Liserre M., Sauter T., Hung J.Y. Future energy systems: Integrating renewable energy sources into the smart power grid through industrial electronics. *IEEE Industrial Electronics Magazine*: March, 2010, vol. 4, iss. 1, pp. 18-37, available at: <http://dx.doi.org/10.1109/MIE.2010.935861>

8. Kychkin A.V. Intellektual'naia informatsionno-diagnosticheskaiia sistema dlia issledovaniia krovenosnykh sosudov [Intelligent information-

diagnostic system for blood vessels research]. *Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Teoriia i sistemy upravleniia*, 2013, no. 3, pp. 114-123.

9. Gladkov L.A., Kureichik V.V., Kureichik V.M. *Geneticheskie algoritmy* [Genetic algorithms]. Moscow: Fizmatlit, 2006.

10. Kychkin A.V., Chudinov A.V. *Optimizatsiia raspredeleniia moshchnosti v polunaturnoi modeli lokal'noi aktivno-adaptivnoi elektroenergeticheskoi seti* [The power distribution optimization in the half-sized model of local active-adaptive electric power network]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2014, no. 3 (11), pp. 81-93.

### **Сведения об авторах**

**Кычкин Алексей Владимирович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: aleksey.kychkin@gmail.com).

**Чудинов Александр Валерьевич** (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: aleksander.tchudinov@yandex.ru).

### **About the authors**

**Kichkin Alexey Vladimirovich** (Perm, Russian Federation) is Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Automation Microprocessors Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail: aleksey.kychkin@gmail.com).

**Chudinov Alexander Valeryevich** (Perm, Russian Federation) is a student Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail: aleksander.tchudinov@yandex.ru).

Получено 06.07.2015