

УДК 621.311
DOI: 10.15827/0236-235X.118.333-337

Дата подачи статьи: 12.01.17
2017. Т. 30. № 2. С. 333–337

О ПРОГРАММЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ УЗЛОВЫХ ЦЕН НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

*Э.Д. Халилов, к.т.н., доцент, начальник отдела, elmanxalilov2010@mail.ru
(Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-испытательский институт
энергетики, ул. Зардаби Гасанбека, 94, г. Баку, Аз1012, Азербайджан)*

В условиях реформ системы электроснабжения разных стран, в том числе Азербайджана, появилась возможность использования возобновляемых источников электроэнергии в электрической сети. Актуальными стали исследования, основанные на прослеживании потоков мощности. Появились исследования прослеживания мощности «зеленых» генераторов и мощности искажений источников гармоник.

Торговля электроэнергией на оптовом рынке осуществляется с использованием таких механизмов, как рынок на сутки вперед, балансирующий рынок, рынок регулируемых договоров, свободные договора купли-продажи электроэнергии.

Различная стоимость электроэнергии у разных поставщиков обусловила актуальность задачи определения узловых цен. Узловые цены определяют стоимость единицы электроэнергии, покупаемой в узле, и включают в себя маргинальную цену балансирующего узла, потери в линии электропередачи, цену ограничений линии электропередачи. Для расчета этих составляющих требуется соответствующее ПО.

Разработан алгоритм для моделирования узловых цен на рынке электроэнергии. Он реализован в виде программы в среде MATLAB. Работоспособность программы проверена на различных тестовых схемах.

Приведены результаты расчетов узловых цен на примере семиузловой тестовой схемы электрической сети.

Ключевые слова: рынок электроэнергии, узловые цены, моделирование, алгоритм, активная мощность, фиктивные узлы, фиктивные ветви, MATLAB.

В условиях продолжающихся реформ отрасли электроснабжения появилась возможность для широкого включения возобновляемых источников электроэнергии (ЭЭ) в электрической сети. Стали актуальными исследования, основанные на прослеживании потоков мощности. В последние годы появляются исследования по отслеживанию мощности «зеленых» генераторов и мощности искажений источников гармоник. Для решения задачи адресности мощностей нашли применение матричный подход, развитый Биалеком, и подход, основанный на применении теории графов [1–3].

Как товар ЭЭ является предметом купли-продажи. Торговля ЭЭ на оптовом рынке осуществляется с использованием таких рыночных механизмов, как рынок на сутки вперед, балансирующий рынок, рынок регулируемых договоров, свободные договоры купли-продажи [4, 5].

Рынок на сутки вперед – это аукцион ценовых заявок на продажу и покупку ЭЭ, проводимый на каждый час за сутки до фактической поставки ЭЭ. В рамках торговли на рынке на сутки вперед поставщики и покупатели подают ценовые заявки коммерческому оператору, в которых указывают, какой объем ЭЭ в какой час и по какой цене они готовы поставить или купить соответственно.

Конкурентному рынку присуще заблаговременное планирование режимов работы генерирующего оборудования производителей ЭЭ, что связано с невозможностью одновременного ввода в работу этого оборудования. Возможность планирования на рынке на сутки вперед соответствует времени пуска генерирующего оборудования.

Балансирующий рынок – рынок отклонений в реальном времени. На балансирующем рынке про-

исходит купля-продажа объемов ЭЭ, потребленных сверх плановых объемов или не потребленных относительно плановых объемов.

Особенностью балансирующего рынка ЭЭ является то, что на нем не определяется состав оборудования. Основной задачей этого рынка является оптимальное экономическое и технологическое поддержание баланса ЭЭ.

На энергетических рынках мира наибольшее распространение получили две основные модели: пул и двусторонние контракты. Пул чаще используется на оперативных рынках и рынках на сутки вперед, а двойной контракт – при долгосрочных контрактах (от недели до нескольких лет) [4, 5].

Оптимизационная модель рынка ЭЭ

Целевая функция (социальное благосостояние) рынка ЭЭ имеет вид

– в одностороннем аукционе:

$$\min \sum_{j=1}^n c_{g_j} P_{g_j} ; \max \sum_{i=1}^m c_{d_i} P_{d_i} ; \quad (1)$$

– в двухстороннем аукционе:

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^m c_{d_i} P_{d_i} - \sum_{j=1}^n c_{g_j} P_{g_j} \right\}. \quad (2)$$

При этом учитываются балансовые ограничения активной и реактивной мощности в узлах, сетевые ограничения, то есть ограничения перетоков активной мощности по контролируемым сечениям, а также ограничения на диапазон изменения оптимизируемых переменных [6–10]:

$$\sum_i P_{ij} + \sum_g P_g - \sum_c P_c = 0, \quad \sum_i Q_{ij} + \sum_g Q_g - \sum_c Q_c = 0,$$

$$P_s^{\min} \leq \sum_{ij \in s} P_{ij} \leq P_s^{\max}, \quad 0 \leq P_g \leq P_g^{\max}, \quad 0 \leq Q_g \leq Q_g^{\max},$$

$$0 \leq P_c \leq P_c^{\max}, \quad U_j^{\min} \leq U_j \leq U_j^{\max},$$

где d – потребление в узле; g – генерация; c_{d_i} – узловая цена покупки активной мощности; c_{g_j} – узловая цена продажи активной мощности; P_{d_i} – узловое потребление активной мощности; P_{g_i} – узловая генерация активной мощности; n, m – количество заявок на производство и потребление активной мощности; U_j – узловое напряжение; P_{ij} и Q_{ij} – перетоки мощности из узла j в узел i по ветви ij ; s – контролируемые сечения.

В односторонних аукционах присутствуют отдельные составляющие целевой функции и целевая функция представлена компонентами, соответствующими ценовым заявкам продавцов или покупателей.

Коммерческие отношения в *электроэнергетических системах* (ЭЭС) приводят к необходимости использования финансово-технологических моделей систем для успешного функционирования электроэнергетической отрасли. В этих моделях рассматриваются не только технологические переменные, описывающие режим ЭЭС, связывающие эти переменные ограничения в виде равенств и неравенств, но и переменные, учитывающие финансовые факторы и уравнения финансовых балансов, связывающие эти переменные. Финансово-технологические модели ЭЭС позволяют имитировать поведение ЭЭС в различных финансовых и технологических ситуациях. Данные модели используют информацию об адресности генерации перетоков мощности и нагрузок [6, 7].

Математические модели узловых цен

Важнейшими финансовыми показателями являются узловые цены, они отражают стоимость единицы ЭЭ, покупаемой в узле. Среди посвященных узловым ценам работ следует отметить [6–10].

Узловые цены определяют стоимость единицы ЭЭ, покупаемой в узле, и включают в себя маргинальную цену балансирующего узла, потери в линии электропередачи, цену ограничений линии электропередачи. Расчет этих составляющих требует разработки соответствующего ПО.

В [6] для получения узловых цен использованы финансово-технологические модели. В [7] узловые средневзвешенные цены для взаиморасчетов потребителей и производителей ЭЭ рассчитываются на основе алгоритмов определения средневзвешенных цен по зафиксированным потокам ЭЭ и ценовым заявкам источников. Анализируется чувствительность узловых цен к ценовым заявкам и изменениям перетоков.

В [8] для моделирования рынка ЭЭ применен механизм аукциона. После отбора наиболее эконо-

мичных генерирующих мощностей при соблюдении всех ограничений формируется двойственная задача линейного программирования. В результате решения этой задачи определяются стоимость достигнутых ограничений по связям и узловые цены. На основании этих данных и с учетом правил принятия решения можно проанализировать эффективность подачи участником ценовых заявок.

В [9] предложена система интегральных показателей разницы узловых цен, включающая стоимостные, ценовые и физические показатели. Предложенная система позволяет количественно оценить влияние режимов ЭЭС на разницу цен в узлах при решении оптимизационной задачи оптового рынка ЭЭ.

В [10] на примере тестовой девятиузловой схемы ЭЭС рассматривается влияние изменения ценовых заявок производителей ЭЭ на узловые цены для потребителей. Производятся анализ полученных результатов и их обобщение. В данной работе узловые цены определяются совместной реализацией методов линейного и нелинейного программирования с применением метода неопределенных множителей Лагранжа.

В [11] разработана математическая модель, в которой режимные ограничения учитываются методом Лагранжа, а потери – с использованием R-схемы и коэффициентов токораспределения.

Математические модели узловых цен могут быть использованы в качестве информационной поддержки для системного оператора, администратора торговой системы. Участники рынка, используя узловые цены, полученные с помощью этих моделей, могут правильно выбрать стратегию поведения на рынке. Кроме этого, узловые цены обеспечивают адекватное распределение платы за ЭЭ. При этом потребитель платит пропорционально затратам на выработку потребленной им ЭЭ.

В данной статье рассматриваются матричный алгоритм и программа для моделирования узловых цен с возможностью стыковки с программой токораспределения или оценивания состояния.

Моделирование и результаты расчетов узловых цен

Основу матричного метода составляет уравнение

$$G_i(P_{gi}) + \sum c_j P_{ji} = c_i \cdot P_{Hi} + c_i \cdot \sum P_{ji}, \quad (3)$$

$i = 1, \dots, n.$

В данном уравнении первое слагаемое в левой части – затраты на производство мощности P_{gi} , второе слагаемое – затраты на покупку перетоков мощности P_{ji} в i -й узел из узлов j по цене c_j [6, 7]. Первое слагаемое в правой части – выручка от продажи нагрузки P_{Hi} в узле i , второе – выручка от продажи перетоков мощности P_{ij} из узла i по цене продажи c_i .

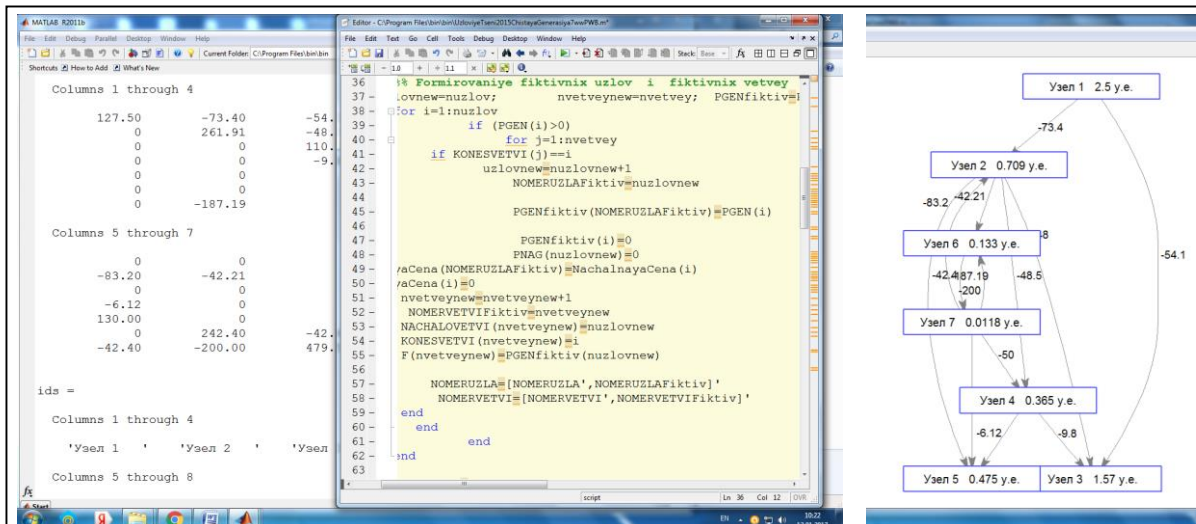


Рис. 1. Программа моделирования узловых цен

Fig. 1. The program for nodal prices modeling

Следует отметить, что для учета потерь ΔP_{ij} в ветви $i-j$ цена c_j увеличивается до значения c_{ij} , определяемой из условия $c_{ij} = \frac{c_j P_{ji}}{P_{ij}}$, где $P_{ji} = P_{ij} + \Delta P_{ij}$.

В матричной форме уравнение (3) можно представить в виде

$$A \cdot c = G, \tag{4}$$

где G – ценовая заявка генераторов или их расходные характеристики; c – узловые цены. Диагональные элементы матрицы A представляют собой сумму нагрузки в узле с отходящими потоками:

$$A_{ii} = P_{n,i} + \sum_{j=1}^K P_{ij}, \tag{5}$$

где K – число узлов, в которые текут потоки мощности из узла i . Недиagonalными элементами матрицы A являются втекающие в узел потоки мощности:

$$A_{ij} = -P_{ji}. \tag{6}$$

Разработан алгоритм для моделирования узловых цен, состоящий из шести этапов.

1. Расчет установившегося режима сети.
2. Передача необходимой информации об узлах и ветвях в программу узловых цен.
3. Формирование матриц узловых инъекций мощности, потоков мощности.
4. Формирование фиктивных узлов и фиктивных ветвей.
5. Формирование матрицы потоков мощности.
6. Определение узловых цен.

Разработанный алгоритм реализован в виде MATLAB-программы (рис. 1). Данные по узлам и ветвям, а также результаты расчета установившегося режима схемы приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1
Исходные данные семиузловой схемы (по узлам)

Table 1
Initial data for 7-node scheme (node data)

Узел	Модуль и угол напряжения		Нагрузка		Генерация	
	U (о.е.)	δ (град.)	P_n (МВт)	Q_n (МВАр)	P_r (МВт)	Q_r (МВАр)
1	1.05	6.4			127.54	18.02
2	1.04	4.13	40	20	187.19	46.02
3	0.99	-0.34	110	40		
4	1	-0.2	80	30	50	14.57
5	1.01	-1.17	130	40		
6	1.04	2.75	200	0	200.17	-6.58
7	1.04	0	200	0	200.49	38.64

Таблица 2
Исходные данные семиузловой схемы (по ветвям)

Table 2
Initial data for 7-node scheme (branch data)

Номер ветви	От узла	К узлу	P_{ij} , МВт
1	1	2	73.4
2	1	3	54.1
3	2	3	48
4	2	4	46.5
5	2	5	83.2
6	2	6	42.2
7	3	4	-9.8
8	4	5	6
9	7	5	42.4
10	6	7	42.4

Работоспособность программы проверена на различных тестовых схемах IEEE. На рисунке 2 изображена семиузловая тестовая схема [12]. В таблице 3 приведены результаты расчета узловых цен.

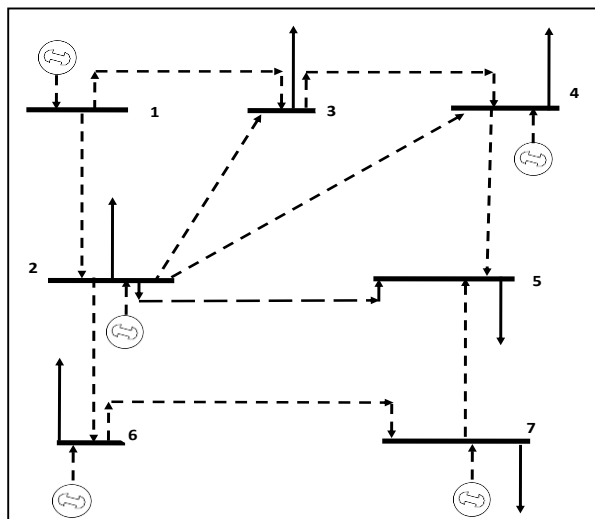


Рис. 2. Тестовая семиузловая схема

Fig. 2. 7-node test scheme

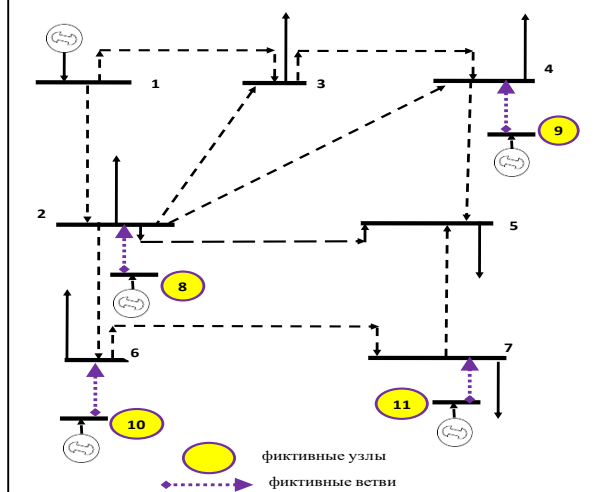


Рис. 3. Тестовая схема после добавления фиктивных узлов и ветвей

Fig. 3. The test scheme after adding fictitious nodes and branches

В ходе работы программа автоматически формирует списки фиктивных узлов и фиктивных ветвей для получения чистой генерации. На рисунке 3 приведена тестовая схема после добавления фиктивных узлов и ветвей. Как видим, к узлам 2, 4, 6 и 7 добавляются фиктивные ветви. В результате такого преобразования генерация в узлах 2, 4, 6 и 7 присвоена фиктивным узлам 8, 9, 10 и 11. В таблице 4 дана информация по ветвям после окончания расчетов. Выделенная часть в таблицах 2 и 3 соответствует фиктивным узлам и ветвям соответственно.

Таблица 4

Информация по ветвям после окончания расчетов

Table 4

The information on branches after calculations

Номер ветви	От узла	К узлу	P_{ij}
1	1	2	73.4
2	1	3	54.1
3	2	3	48
4	2	4	48.5
5	2	5	83.2
6	2	6	42.2
7	3	4	-9.8
8	4	5	6
9	7	5	42.4
10	6	7	42.4
11	8	2	187.19
12	9	4	50
13	10	6	200
14	11	7	200

Результаты расчетов узловых цен показывают, что в разных узлах ЭЭС образуются разные узловые цены, которые могут быть использованы в рыночных условиях при ценовых заявках.

Выводы

В статье описаны разработанные алгоритм и программа в среде MATLAB для моделирования узловых цен на основе матричного подхода. На примере семиузловой схемы электрической сети проведены расчеты узловых цен. Результаты расчетов по разработанной программе могут быть использованы в рыночных условиях при ценовых заявках.

Литература

1. Bialek J.W. Tracing the flow of electricity. IEE Proc-Gener., Transm., and Distrib., Jul. 1996, vol. 143, pp. 310–320.
2. Гамм А.З., Голуб И.И. Адресность передачи активных и реактивных мощностей в электроэнергетической системе // Электричество. 2003. № 3. С. 9–16.
3. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д. О прослеживании путей передачи мощностей в энергосистемах // Проблемы энергетики. 2011. № 4. С. 10–17.
4. Стофт С. Экономика энергосистем. Введение в проектирование рынков электроэнергии; [пер. с англ.]. М.: Мир, 2006. 623 с.
5. Беляев Л.С. Проблемы электроэнергетического рынка. Новосибирск: Наука, 2009. 296 с.
6. Гамм А.З., Войтов О.Н., Голуб И.И., Брояков Ю.А. Техничко-экономические модели электроэнергетических систем // Информационные технологии контроля и управления на

Таблица 3

Изменение узловых цен в ходе расчета

Table 3

Nodal price changes during calculation

Но- мер узла	Рген0, МВт	Рген, МВт	Исходная уз- ловая цена (y.e.)	Узловая цена после расчета (y.e.)
1	127.54	127.54	2.5	2.5
2	187.19	0	3	2.85
3	0	0	0	2.79
4	50	0	4	3.52
5	0	0	0	2.59
6	200.17	0	2	2.15
7	200.49	0	1.8	1.86
8	-	187.19	-	3
9	-	50	-	4
10	-	200	-	2
11	-	200	-	1.8

транспорте: сб. науч. тр. Иркутск: Изд-во ИРИИТ, 2000. Вып. 7. С. 145–154.

7. Гамм А.З., Голуб И.И., Батюнин А.В., Гамм А.А. Узловые средневзвешенные цены на электроэнергию // *Электричество*. 2005. № 10. С. 17–24.

8. Аюев Б.И., Ерохин П.М., Паниковская Т.Ю. Применение механизма аукциона для моделирования рынка электроэнергии // *Изв. Томского политехнич. ун-та*. 2005. Т. 308. № 5. С. 176–178.

9. Васьяковская Т.А. Показатели разницы узловых цен на

оптовом рынке электроэнергии // *Электричество*. 2007. № 2. С. 23–27.

10. Mahnitko A., Gerhards J., Ribakovs S., Umbraško I. Pricing questions in the electric power markets. *Power and Electrical Engineering*, 2009, part 4, vol. 24, pp. 16–23.

11. Булатов Б.Г., Каркунов В.О. Упрощенная модель определения узловых цен на рынке электроэнергии // *Вестн. ЮУрГУ. Сер. Энергетика*. 2009. Вып. 12. № 34. С. 11–14.

12. PowerWorld. URL: <http://www.powerworld.com/products/simulator/overview> (дата обращения: 11.01.2017).

Software & Systems

DOI: 10.15827/0236-235X.118.333-337

Received 12.01.17

2017, vol. 30, no. 2, pp. 333–337

ON MODELING OF ELECTRICITY NODAL PRICES

*E.D. Khalilov*¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of Department, elmanxalilov2010@mail.ru

¹Azerbaijan Scientific-Research and Design-Prospecting Power Engineering Institute, Zardabi St. 94, Baku, Az1012, Azerbaijan

Abstract. In terms of power supply system reforms in various countries, including Azerbaijan, there is a possibility of using renewable energy sources in the electrical network. Relevant studies began to trace the power of “green” power generators and harmonic distortion sources.

Electrical energy trading on the wholesale market uses market mechanisms, such as a day-ahead market, a balancing market, a market of regulated contracts, and free electricity sale and purchase agreements.

As generating stations and other suppliers have variable cost of electricity, this fact leads to solving the relevant problem of determining nodal prices. Nodal prices show a electricity unit cost purchased in a node. Each node price includes such components as a marginal price of a balancing node, losses in transmission lines, power line price restrictions. Calculation of these components requires development of the appropriate software.

The paper describes the developed algorithm for simulation of nodal prices. This algorithm is implemented as a program in MATLAB system to determine nodal prices in the electricity market. The software efficiency is tested at different test schemes. In particular, this article presents the results of nodal price calculations using the example of 7-node test scheme of electrical network.

Keywords: electricity market, nodal prices, modeling, algorithm, active power, fictitious nodes, fictitious branches, MATLAB.

References

1. Bialek J.W. Tracing the Flow of Electricity. *IEE Proc-Gener., Transm., and Distrib.* 1996, vol. 143, pp. 310–320.
2. Gamm A.Z., Golub I.I. Address capacity of power transfer in an electrical power system. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2003, no. 3, pp. 9–16 (in Russ.).
3. Balametov A.B., Halilov E.D. On tracking transmission routes in electric systems. *Problemy energetiki* [Power Industry Problems], Baku, 2011, no. 4, pp. 10–17 (in Russ.).
4. Stoff S. *Power System Economics: Designing Markets for Electricity*. Wiley and Sons Publ., 2002, part 1.
5. Belyaev L.S. *Problemy elektroenergeticheskogo rynka* [Electrical Power Market Problems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2009, 296 p.
6. Gamm A.Z., Voytov O.N., Golub I.I., Brovyakov Yu.A. Technical and economic models of electrical power systems. *Informatsionnye tekhnologii kontrolya i upravleniya na transporte* [Information Technologies of Transport Control and Management]. Irkutsk, IrIIT Publ., 2000, iss. 7, pp. 145–154 (in Russ.).
7. Gamm A.Z., Golub I.I., Batyunin A.V., Gamm A.A. Node weighted average electricity prices. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2005, no. 10, pp. 17–24 (in Russ.).
8. Ayuev B.I., Erokhin P.M., Panikovskaya T.Yu. Using the auction mechanism for modeling an electrical power market. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic Univ.]. 2005, vol. 308, no. 5, pp. 176–178 (in Russ.).
9. Vaskovskaya T.A. Level of node price margin in the electrical power market. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2007, no. 2, pp. 23–27 (in Russ.).
10. Mahnitko A., Gerhards J., Ribakovs S., Umbraško I. Pricing questions in the electric power markets. *Power and Electrical Engineering*. Riga, RTU Publ., 2009, part 4, vol. 24, pp. 16–23.
11. Bulatov B.G., Karkunov V.O. Simplified methods of nodal prices determination at the electric energy market. *Vestnik YuUrGU* [Bulletin of the South Ural State Univ.]. Series Power Engineering, 2009, no. 34, pp. 11–14 (in Russ.).
12. *PowerWorld Simulator*. Available at: <http://www.powerworld.com/products/simulator/overview> (accessed January 11, 2017).