

Варганов Д.Е.¹, Варганова А.В.², Баранкова И.И.²¹ООО «ЮГРАЭНЕРГО»²ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГАЗОПОРШНЕВЫХ УСТАНОВОК С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГОУЗЛОВ С ИСТОЧНИКАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

В работе рассмотрен вопрос разработки и построения моделей газопоршневых установок, работающих на природном газе, с использованием структурно-функционального прикладного метода экономико-математического моделирования и представляющих собой зависимость затрат на природный газ от мощности, вырабатываемой на клеммах источника электрической энергии. При моделировании установок учтен фактор изменения цен на первичный энергоноситель для периода с 2014 по 2020 гг. в виде коэффициента инфляции. Модели построены для трех периодов: по состоянию цен на 2014, 2018 и 2020 г. и адаптированы для оптимизации эксплуатационных режимов энергоузлов с источниками малой генерации. Алгоритм оптимизации разработан с применением частного случая принципа Беллмана (метода динамического программирования) и реализован в оригинальном программном продукте «КАТРАН».

Ключевые слова: газопоршневая установка, оптимальный эксплуатационный режим, когенерационная энергетическая установка, энергоузел, система электроснабжения, выработка электроэнергии, источник распределенной генерации.

ВВЕДЕНИЕ

Крупные промышленные предприятия характеризуются сложной системой электроснабжения с разнородными генерирующими источниками: турбогенераторами, парогазовыми, газотурбинными и газопоршневыми установками. Для управления такими системами более эффективно применяются различные способы; например, с целью сокращения потерь мощности в распределительных сетях устанавливаются компенсирующие устройства [1]. В работе [2] учитывается влияние электромагнитной совместимости электроприемников с резкопеременной нагрузкой.

Применение методов оптимизации с целью повышения эффективности работы электроэнергетических систем и систем электроснабжения является одним из способов решения данной задачи. В статьях [3, 4] рассматриваются вопросы применения алгоритма оптимизации, разработанного с использованием математического ожидания двойственных оценок и позволяющего оценивать балансовую надежность электроэнергетических систем. В [5, 6] приведена методика определения рациональных загрузок генераторов электроэнергетических систем с применением метода декомпозиции узловых цен. Исследуются также и проблемы внутристанционной оптимизации загрузок генерирующих установок ГРЭС на примере Березовской ГРЭС [7] с использованием эквивалентных энергетических характеристик рассматриваемых электростанций.

Автором работы [8] приведены оптимизационные модели тепловых электростанций, входящих в электроэнергетическую систему, в качестве критерия оптимизации выбрано «...равенство относительных приростов расхода топлива на выработку активной мощности...». Внедрение разработанных моделей позволяет экономить до 2000 т у.т./г. В [9] рассмотрен подход оптимизации источников электроэнергии электроэнергетических систем, позволяющий управлять рацио-

нальным потреблением энергетических ресурсов.

Для оптимизации режимов электрических сетей применяются методы, основанные, например, на эволюционном алгоритме [10]. Другие подходы приведены в [11-14]. Рассматриваются вопросы оптимального управления в системах Smart Grid [15] и сетях сельскохозяйственных предприятий [16].

Описанные подходы в основном ориентированы на повышение эффективности функционирования источников электроэнергии систем и слабо отражают все принципиально важные отличия систем электроснабжения промышленных предприятий, а именно наличие электроприемников с резкопеременной нагрузкой, короткие линии напряжением от 6 до 220 кВ, наличие собственных электростанций с разнородными генераторами. Данные особенности учтены при применении подхода, описанного в [17]. Алгоритм оптимизации основан на методе динамического программирования и методе последовательного эквивалентирования [18].

Основными исходными данными для оптимизации являются модели генераторов, представляющие собой зависимость себестоимости массового расхода топлива от мощности на его клеммах.

Однако разработанные модели ориентированы на турбогенераторы, которые в основном были установлены на электростанциях в середине прошлого века и характеризуются повышенной степенью износа. Для сохранения собственных мощностей на площадках предприятий устанавливают быстроводимые в эксплуатацию газопоршневые, парогазовые и газотурбинные установки, работающие на природном газе или на вторичных (например, коксовом или доменном). С целью оптимизации режимов работы систем электроснабжения с такими установками необходимо осуществить их моделирование.

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГАЗОПОРШНЕВЫХ УСТАНОВОК

Технико-экономические модели (ТЭМ) установок распределенной генерации представляют собой зави-

смость мощности на клеммах генератора от себестоимости вырабатываемой электрической энергии. Расчет таких моделей начинается с изучения конструкции и технических характеристик генераторов. ТЭМ данных источников электроэнергии можно записать в виде математического выражения

$$S_i(P_i) = \frac{\beta \cdot B_i}{3600 \cdot P_i}, \quad (1)$$

где S_i – себестоимость электроэнергии, руб./МВт·ч; β - тариф на используемый энергетический ресурс, руб./тыс. м³, природный газ (ПГ) 2706,51 руб./тыс. м³; B_i – удельный расход топлива, тыс. м³/МВт·ч; P_i – активная мощность генератора, МВт.

В паспортных данных газопоршневых установок приведены величины удельного расхода топлива на производство одного 1 кВт в кДж, данную величину необходимо привести к единицам измерения используемого топлива, с целью упрощения дальнейших расчетов и исключения ошибок при приведении к одинаковым единицам измерения массового расхода различных видов топлива с разной калорийностью. На рассматриваемых установках это природный газ: 1 тыс. м³ природного газа = 1/34000000 кДж.

Для исследуемого объекта когенераторные электростанции имеют единичную электрическую мощность 10 МВт с установкой на них автономных газопоршневых установок *Wartsila*, вырабатывающих также пар низкого давления и горячую воду. Общий коэффициент использования топлива достигает 90%. Станции обладают высокой рабочей эффективностью – КПД составляет ~40-45 %. Когенерационные электростанции *Wartsila* приспособлены для работы на различных газообразных видах топлива и жидких топливных компонентах, включая биотопливо. Электростанции имеют достаточно низкие выбросы в своем классе. Основные номинальные параметры рассматриваемой газопоршневой установки (модель 20V34SG) согласно [19]: мощность электрическая - 9730 кВт; КПД электрический - 46,3 %; удельный расход топлива - 7779 кДж/кВт·ч. Для газопоршневой установки мощностью 10 МВт производства корпорации *Wartsila* (Финляндия) удельный расход топлива является величиной постоянной и составляет 7779 кДж/кВт·ч. Таким образом, согласно (1)

$$S_i(P_i) = \frac{7779000 \cdot 2706,51}{34000000 \cdot 1 \cdot 3600};$$

$$S_i(P_i) = \frac{0,172}{1} = 0,172 \text{ руб./МВт·ч.}$$

На основании паспортных данных максимальная мощность, которую может вырабатывать данная установка, составляет 10 МВт, а согласно заданию потребителя минимальная мощность – 6 МВт.

Кроме того, так как исследования проводятся и для перспективных схем, то при расчете моделей для 2018 и 2020 гг. необходимо учесть величину инфляции.

Согласно данным, приведенным на сайте [20], среднегодовой уровень инфляции за последние пять лет составит примерно 8 %, таким образом, величину стоимостных показателей энергоресурсов необходимо

увеличить на 32 %, а на 2020 г. – на 48 % относительно цен 2014 г. Таким образом, расчетные модели газопоршневых установок будут иметь вид, представленный в таблице.

Программно-вычислительный комплекс преобразует данные модели к виду, представленному на рис. 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ В УСЛОВИЯХ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ИСТОЧНИКАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Рассматривалась система электроснабжения с внешними источниками и газопоршневыми установками, схема сети которой разработана в ПВК «КАТ-РАН» (рис. 2).

В результате оптимизационных расчетов, выполненных с использованием оригинального алгоритма, описанного в [18, 21] и реализованного в ПВК «КАТ-РАН» [22], построены оптимальные карты мощностей газопоршневых установок фирмы *Wartsila*, представленные на рис. 3-4 и отражающие экономически целесообразные загрузки установок (P_g) от мощности, приобретаемой из системы ($\Sigma P_{\text{систем}}$).

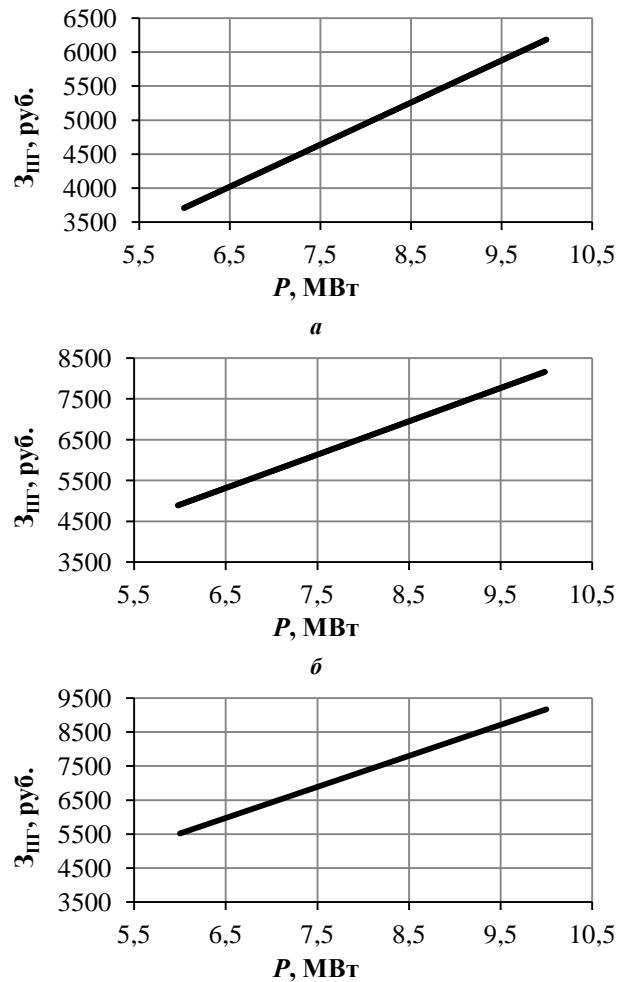


Рис. 1. Технико-экономические модели газопоршневой установки 10 МВт производства корпорации *Wartsila* с учетом цен 2014 г. (а), 2018 г. (б) и 2020 г. (в)

Технико-экономические модели газопоршневой установки 10 МВт

Параметр	Мощность	Расход ПГ		Затраты на ПГ	Себестоимость э/э
Условное обозначение	P , МВт	B_r , МДж/МВт·ч	B_r , тыс. м ³	Z_r , руб.	S , руб./МВт·ч
Расчетная формула	Паспортные данные	$7779000 \cdot P$	$B_r(\text{МДж}/\text{МВт}\cdot\text{ч})/(34 \cdot 10^6)$	$B_r(\text{тыс.м}^3) \cdot 2706,51$	$Z_r/(P \cdot 3600)$
2014 г.					
1	6	46674000	1,372765	3715,401	0,172
2	7	54453000	1,601559	4334,635	0,172
3	8	62232000	1,830353	4953,869	0,172
4	9	70011000	2,059147	5573,102	0,172
5	10	77790000	2,287941	6192,336	0,172
2018 г.					
1	6	46674000	1,372765	4904,330	0,227
2	7	54453000	1,601559	5721,718	0,227
3	8	62232000	1,830353	6539,106	0,227
4	9	70011000	2,059147	7356,495	0,227
5	10	77790000	2,287941	8173,883	0,227
2020 г.					
1	6	46674000	1,372765	5498,794	0,255
2	7	54453000	1,601559	6415,260	0,255
3	8	62232000	1,830353	7331,725	0,255
4	9	70011000	2,059147	8248,191	0,255
5	10	77790000	2,287941	9164,657	0,255

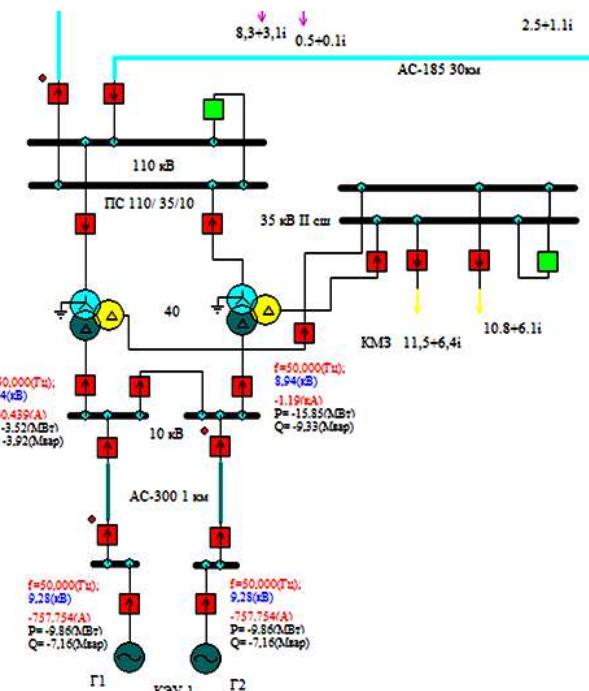


Рис. 2. Электрическая схема исследуемой системы электроснабжения

установки Г 1 от мощности, принимаемой из системы

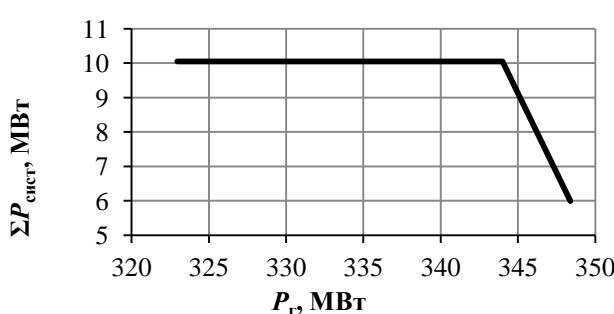


Рис. 3. Зависимость мощности на клеммах

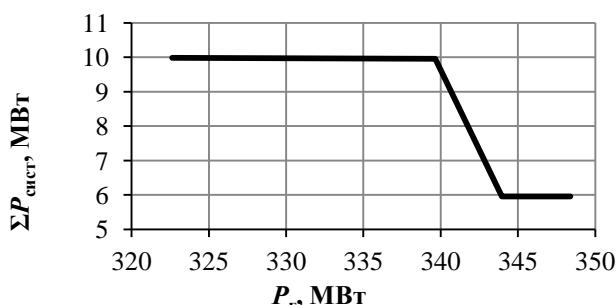


Рис. 4. Зависимость мощности на клеммах установки Г 2 от мощности, принимаемой из системы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные зависимости являются наглядными исходными данными для разработанного алгоритма оптимизации, позволяют в полной мере отразить все технические ограничения по работе установок, одновременно включая в себя экономическую составляющую, связанную с расчетом себестоимости электроэнергии. Кроме того, рассчитанные модели учитывают прогнозное изменение стоимости энергоносителей с использование среднегодового коэффициента инфляции за последние 5 лет.

Рассчитанные оптимальные диаграммы мощностей источников распределенной генерации единичной мощностью 10 кВт производства *Wartsila* с использованием ПВК «КАТРАН», представляющие собой зависимость мощности на клеммах генератора от мощности, принимаемой из системы, позволяют для существующей и перспективных рассматриваемых схем определять рекомендуемые мощности установок распределенной генерации, полученные по критерию минимума суммарных затрат на первичный энергоноситель, в данном случае природный газ.

В результате оценки эффективности внедрения результатов работы улучшение показателей в среднем возрастает на 1,46% [23-26].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Компенсирующие устройства в системах промышленного электроснабжения / Г.П. Корнилов, А.С. Карандаев, А.А. Николаев, А.Н. Шеметов и др. Магнитогорск: Издво Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 235 с.
2. Корнилов Г.П., Шеметов А.Н., Осипов А.В. Современные проблемы электромагнитной совместимости в системах электроснабжения с резкопеременными и нелинейными нагрузками // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. №4. С. 89-93.
3. Крупенев Д.С., Пержабинский С.М. Алгоритм оптимизации надёжности электроэнергетических систем с использованием математического ожидания двойственных оценок // Управление большими системами: сборник трудов. 2015. № 54. С. 166-178.
4. Крупенев Д.С., Пержабинский С.М. Алгоритм оптимизации балансовой надежности электроэнергетических систем // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2014. № 2. С. 96-106.
5. Васьковская Т.А. Новая декомпозиция узловых цен на вклады ценообразующих заявок при оптимизации режимов электрических систем // Электричество. 2015. №7. С. 21-31.
6. Vaskovskaya T.A. Possibility of controlling nonregulated prices in the electricity market by means of varying the parameters of a power system // Thermal Engineering. 2014, no.13, pp.977-980.
7. Щербич В.И., Щербич Е.А., Радченко В.А. Программы оптимизации распределения нагрузок между энергоблоками и расчета эквивалентной энергетической характеристики Березовской ГРЭС // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2013. № 2. С. 57-69.
8. Питолин В.Е. Применение имитационной модели для оптимизации параметров тепловой электростанции в составе энергосистемы // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С: Фундаментальные науки. 2013. №4. С. 40-45.
9. Bakunov R.R., Mechonoshin A.S. Structure optimization of power resources management systems // Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности. 2013. №1. С. 20-22.
10. Борисов Г.А., Кукин В.Д. Эволюционный алгоритм оптимизации распределительной электрической сети // Ученые записки петрозаводского государственного университета. Серия: естественные и технические науки. 2012. №2. С. 67-70.
11. Фурсанов М.И. Введение в оптимизацию разомкнутых электрических сетей по дискретным параметрам // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2012. № 3. С. 13-22.
12. Meta-heuristics optimization algorithms in engineering, business, economics, and finance / Voropai N.I., Gamm A.Z., Glazunova A.M., Etingov P.V., Kolosok I.N., Korkina E.S., Kurbatsky V.G., Sidorov D.N., Spiryaev V.A., Tomin N.V., Zaika R.A., Bat-Undraal B. 2012. 615 p.
13. Voropai N.I., Zorkaltsev V.I. Optimization models and methods developed at the energy systems institute // International journal of energy optimization and engineering. 2013, no.4, pp. 1-15.
14. Marinović M., Makajić-Nikolić D., Stanojević M. Optimization in day-ahead planning of energy trading // Journal of applied engineering science. 2013, no.4, pp. 201-208.
15. Sokolnikova T.V. Energy storage modeling and optimization for Smart Grid // Res electricae magdeburgenses. 2012, pp. 91-99.
16. Математическое моделирование задач оптимизации автоматизированного управления деятельностью энергетических служб сельскохозяйственных предприятий / В.Я. Хорольский, В.Г. Жданов, Е.А. Логачева. Ставрополь: ООО «Ветеран», 2014. 116 с.
17. Varganova A.V., Panova E.A., Kurilova N.A., Nasibullin A.T. Mathematical modeling of synchronous generators in out-of-balance conditions in the task of electric power supply systems optimization 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), Tomsk, Russia, 2015. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=7414907&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D7414907>.
18. Оптимизация установившихся режимов промышленных систем электроснабжения с разнородными генерирующими источниками при решении задач среднесрочного планирования / А.В. Малафеев, А.В. Кочкина, В.А. Игуменщев, Д.Е. Варганов, А.Д. Ковалев. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 112 с.
19. Wartsila.com: Официальный сайт Wärtsilä Oyj Abp' [Электронный ресурс]. Финляндия. Режим доступа: <http://www.wartsila.com>, свободный.
20. Уровень-инфляции.рф [Электронный ресурс]. Российская Федерация. Режим доступа: уровень-инфляции.рф, свободный.
21. Кочкина А.В. Применение метода динамического программирования для решения задач оптимального распределения активных мощностей между разнородными ге-

- нерирующими источниками собственных электростанций предприятий черной металлургии // Наука и производство Урала. 2012. № 8. С. 204-209.
22. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ «Программа для ЭВМ «Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 7.0» RU 2013616847 / В.А. Игуменцев., А.В. Малафеев, О.В. Газизова, Ю.Н. Кондрашова, А.В. Кочкина, Е.А. Панова. №2013616847, Бюл. № 3.
 23. Построение технико-экономических моделей турбогенераторов и котлоагрегатов собственных электростанций промышленных предприятий / А.В Кочкина, А.В. Малафеев, Н.А. Курилова, Р.П. Нетупский // Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 247-252.
 24. Панова Е.А., Савельева К.С., Кочкина А.В. Оценка допустимости режимов работы синхронных генераторов собственных электростанций промышленных предприятий при пофазном ремонте электрооборудования питанияющих сетей в нормальном и оптимальном режимах // Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 214-220.
 25. Методика оптимизации эксплуатационных режимов промышленных систем электроснабжения / А.В. Кочкина, А.В. Малафеев, Д.Е. Варганов, Н.А. Курилова, И.А. Дубина // Электротехнические системы и комплексы. 2014. № 3 (24). С. 49-53.
 26. Варганов Д.Е., Варганова А.В. Расчет себестоимости свежего пара на крупных тепловых промышленных электростанциях // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 1 (30). С. 24-28.

Поступила в редакцию 19 июня 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

APPLICATION OF ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODELS OF GAS RECIPROCATING UNIT TO IMPROVE OPERATIONAL EFFICIENCY OF POWER CENTER WITH DISTRIBUTED GENERATION SOURCES

Dmitriy E. Varganov

Project engineer, LLC "YUGRAENERGO", Magnitogorsk, Russia.

Aleksandra V. Varganova

Assistant Professor, Industrial Power Supply Systems Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Inna I. Barankova

D.Sc. (Eng.), Associate Professor, Informatics and Information Security Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The article considers the issues of gas reciprocating unit modeling using the structural and functional applied approach of economic and mathematical modeling. Generator simulator taking into account the changing price factor (rate of inflation) of energy supplies for the period from 2014 to 2020. Model development was made for three periods: 2014, 2018, 2020 yrs. and was adopted for optimization of power supply system conditions with distributed generation sources. The optimization algorithm is focused on the special case of Bellman approach (dynamic programming method) and made in the form of software program KATRAN.

Keywords: Gas reciprocating unit, optimal power supply system condition, combined heat production unit, power center, power-supply system, generation, distributed generation source.

REFERENCES

1. Kornilov G.P., Karandaev A.S., Nikolaev A.A., Shemetov A.N. et al. *Kompensiruyushchie ustroystva v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya* [Reactive Power Compensators in Industrial Power Supply Systems]. Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2012. 235 p.
2. Kornilov G.P., Shemetov A.N., Osipov A.V. Modern Problems in Electromagnetic Tolerance of Power Systems with Abruptly Variable and Nonlinear Load. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Scientific and Technical Journal. Russian Electromechanics], 2006, no. 4, pp. 89-93. (In Russian)
3. Krupenev D.S., Applying Average Dual Estimations in Algorithm for Optimal Reliability of Electric Power System. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Large-Scale Systems Control], 2015, no. 54, pp. 166-178. (In Russian)
4. Krupenev D.S., Perzhabinskii S.M. Adequacy Optimization Algorithm of Electric Power Systems. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energy], 2014, no. 2, pp. 96-106. (In Russian)
5. Vaskovskaya T.A. New Decomposition of Price on Deposits of Price Forming Request in Power System Optimization. *Elektrичество* [Electrical Technology Russia], 2015, no.7, pp. 21-31. (In Russian)
6. Vaskovskaya T.A. Possibility of controlling nonregulated prices in the electricity market by means of varying the parameters of a power system. *Thermal Engineering*. 2014, no.13, pp.977-980.
7. Shcherbich V., Shcherbich E., Radchenko V. Programs for Optimization of Load Distribution between Power Plants and Calculation of Equivalent Energy Characteristics of Beryozovskaya GRES. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG. Energetika* [Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations], 2013, no.2, pp.57-69. (In Russian)
8. Pitolin V. Application of Imitating Model for Optimization of Parameters of Thermal Power Plant in the Structure of Electric power system. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo*

- universiteta. Seriya S: Fundamental'nye nauki* [Herald of Polotsk state University. Series C: basic science], 2013, no.4, pp. 40-45. (In Russian)
9. Bakunov R.R., Mechonoshin A.S. Structure Optimization of Power Resources Management Systems. *Innovatsionnye protsessy v issledovatel'skoy i obrazovatel'noy deyatel'nosti* [Innovation processes in research and educational activities], 2013, no. 1, pp. 20-22.
 10. Borisov G.A., Kukin V.D. Evolutionary Algorithm for Optimization of Power Distribution Network. *Uchenye zapiski petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Petrozavodsk state university], 2012, no. 2, pp. 67-70. (In Russian)
 11. Fursanov M. Introduction in Optimization of Open Electrical Circuits for Discrete Parameters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG. Energetika* [Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations], 2012, no. 3, pp. 13-22. (In Russian)
 12. Meta-heuristics optimization algorithms in engineering, business, economics, and finance / Voropai N.I., Gamm A.Z., Glazunova A.M., Etingov P.V., Kolosok I.N., Korkina E.S., Kurbatsky V.G., Sidorov D.N., Spiryaev V.A., Tomin N.V., Zaika R.A., Bat-Undraal B. 2012. 615 p.
 13. Voropai N.I., Zorkaltsev V.I. Optimization models and methods developed at the energy systems institute. International journal of energy optimization and engineering. 2013, no.4, pp. 1-15.
 14. Marinović M., Makajić-Nikolić D., Stanojević M. Optimization in day-ahead planning of energy trading. Journal of applied engineering science. 2013, no.4, pp. 201-208.
 15. Sokolnikova T.V. Energy storage modeling and optimization for Smart Grid. *Res electricae magdeburgenses*. 2012, pp.91-99.
 16. Khorol'skiy V.Ya. , Zhdanov V.G. , Logacheva E.A. *Matematicheskoe modelirovaniye zadach optimizatsii avtomatizirovannogo upravleniya deyatel'nost'yu energeticheskikh sluzhb sel'skokhozyaystvennykh predpriyatiy* [Mathematical modeling of optimization task of activity energy service commercial unit automated control]. Stavropol, LLC Veteran Publ., 2014. 116 p.
 17. Varganova A.V., Panova E.A., Kurilova N.A., Nasibullin A.T. Mathematical modeling of synchronous generators in out-of-balance conditions in the task of electric power supply systems optimization 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), Tomsk, Russia, 2015. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=7414907&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D7414907>.
 18. Malafeev A.V., Kochkina A.V., Igumenshchev V.A., Varganova D.E., Kovalev A.D. *Optimizatsiya ustroystvovshikhsya rezhimov promyshlennykh sistem elektrosnabzheniya s raznorodnymi generiruyushchimi istochnikami pri reshenii zadach srednesrochnogo planirovaniya* [Optimization of Steady-State of Power System With Diverse Generating Sources for Task Intermediate-Term Planning]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2013. 112 p.
 19. Wartsila.com: *Wärtsilä Oyj Ab*. Finland. Available at: <http://www.wartsila.com>.
 20. Уровень-инфляции.рф. Russian Federation. Available at: Уровень-инфляции.рф.
 21. Kochkina A.V. Application of Dynamic Programming to Solve Optimum Distribution of Power Between the Heterogeneity of Auxiliary Power Generation Source of Ferrous Metallurgy Enterprises. *Nauka i proizvodstvo Urala* [Science and Production of the Ural], 2012, no.8, pp. 204-209. (In Russian)
 22. Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Kochkina A.V., Panova E.A. KATRAN 7.0. State Registration Certificate of Software Application. RU 2013616847, no.2013616847, 2013.
 23. Kochkina A.V., Malafeev A.V., Kurilova N.A., Netupskiy R.P. Turbo-generator and boiler techno-economic models obtaining of industrial power plant. *Elektroteknicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2013, no. 21, pp. 247-252. (In Russian)
 24. Panova E.A., Savel'eva K.S., Kochkina A.V. Evaluation of operation acceptability of the industrial enterprises domestic power plants synchronous generators in case of electric equipments' incremental repair of the subtransmission network under normal and optimum operation condition. *Elektroteknicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2013, no. 21, pp. 214-220. (In Russian)
 25. Kochkina A.V., Malafeev A.V., Varganova D.E., Kurilova N.A., Dubina I.A. Optimization methodology of industrial electrical power systems operating condition. *Elektroteknicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2014, no. 3 (24), pp. 49-53. (In Russian)
 26. Varganova D.E., Varganova A.V. Cost calculation of working steam in terms of industrial thermal power stations. *Elektroteknicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 1 (30), pp. 24-28. (In Russian)

Варганов Д.Е., Варганова А.В., Баранкова И.И. Применение экономико-математических моделей газопоршневых установок с целью повышения эффективности работы энергоузлов с источниками распределенной генерации // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С.29-34. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-29-34

Varganova D.E., Varganova A.V., Barankova I.I. Application of Economic and Mathematical Models of Gas Reciprocating Unit to Improve Operational Efficiency of Power Center with Distributed Generation Sources. *Elektroteknicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp.29-34. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-29-34