



Оптимизационная модель источ- ников мощности промышленного энергоузла

Введение

Современные технические средства позволяют внедрять сложные системы управления в работу объектов электроэнергетики, решая при этом одну из главных задач — повышение эффективности их работы за счёт сокращения затрат на производство, передачу и потребление электроэнергии. Большое число научных исследований и разработок направлено на достижение указанной цели. Одни решают поставленную задачу за счёт внедрения специализированных технических средств, другие — за счёт использования управляющих мероприятий. Выбор подхода обусловлен специфическими характеристиками объекта, для которого разрабатываются мероприятия.

При создании специализированного программного обеспечения широко используются методы оптимизации, адаптированные под специфические характеристики объекта исследования. В [1] описаны основные методы оптимизации, которые применимы для решения задач в условиях электроэнергетических систем и энергообъединений. Работа [2] посвящена оптимизации электроэнергетической системы по реактивной мощности с использованием метода «роя частиц», что обеспечивает учёт большого числа параметров элементов системы. В [3] авторы рассматривают решение той же задачи, но с применением алгоритма, моделирующего рост нагрузки.

Наряду с известными методами оптимизации, применяемыми для решения задач в энергетике, в связи с развитием современных подходов и технологий разрабатываются новые методики. Так, в [4] впервые приводится алгоритм оптимизации Grey Wolf, позволяющий осуществлять оптимальное управление энергосистем с солнечными электростанциями.

Повышение эффективности работы объектов электроэнергетики за счёт сокращения затрат на производство, передачу и потребление электроэнергии возможно средствами управления. На достижение данной цели направлено большое число научных исследований и разработок

В условиях систем электроснабжения крупных промышленных предприятий одним из мероприятий по повышению эффективности функционирования энергоузла узла является оптимизация режимов работы его источников энергии, заключающаяся в определении оптимальной загрузки генераторов [5] и котлов электростанций [6], экономически выгодном распределении мощности между собственными электростанциями и внешним источником, решении топливной задачи и т.д.

Рецензия эксперта на статью получена 15.12.2020 [Expert review on the article received on December 15, 2020].

УДК 621.311. Номер научной специальности: 05.14.04.

Оптимизационная модель источников мощности промышленного энергоузла

А. В. Варганова, к.т.н., доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (МГТУ, г. Магнитогорск)

В работе приводится подход к разработке модели промышленного энергоузла, позволяющей по величине нагрузки определять оптимальные загрузки генераторов и приём мощности из энергосистемы. При построении оптимизационной модели использовался метод последовательного эквивалентирования и динамического программирования. Разработанная модель реализована в программном продукте «КАТРАН-OptActivePower».

Ключевые слова: энергоузел, динамическое программирование, оптимизация, тепловая электростанция, узел примыкания к энергосистеме.

UDC 621.311. The number of scientific specialty: 05.14.04.

Optimization model of power sources of an industrial power supply

A.V. Varganova, postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University (Magnitogorsk city)

The paper presents an approach to the development an industrial power unit model, which allows to determine the optimal load of the generators and the reception of power from the power system by amount of load. When constructing the optimization model, the method of sequential equivalence and dynamic programming was used. The developed model is implemented in the KATRAN-OptActivePower software.

Key words: power center, dynamic programming, optimization, thermal power plant, junction to the power system.

С этой целью разрабатывается и внедряется большое число программных продуктов, позволяющих осуществлять оптимизацию режимов работы электростанций. В [7] авторами предложены положения дифференциально-экзегетического подхода при анализе термодинамических режимов работы установок ТЭЦ, что обеспечивает оптимизацию режима работы электростанций. Авторы работы [8] предлагают использовать алгоритм «хаотической оптимизации» для определения экономичных режимов работы электростанций. В [9] данная задача решается за счёт применения корреляционного анализа.

Разрабатываются мероприятия, направленные на поиск оптимальных режимов работы специфического оборудования электростанций [10], особенностей работы электростанций [11] и экологических условий [12].

Рассматриваются вопросы, связанные с оптимизацией режимов работы электростанций в условиях современного конкурентного рынка [13].

Вопросы оптимизации режимов работы объектов электроэнергетики и, в частности, промышленных систем электроснабжения остаются актуальными и, ввиду постоянного совершенствования технических и информационных средств, требуют всё новых исследований и разработок. Кроме того, существующие подходы в области оптимизации режимов крупных энергообъектов не решают комплексную задачу определения экономически целесообразных режимов работы при параллельной работе местных электростанций и энергосистемы.

В данной работе предлагается подход, позволяющий смоделировать промышленную систему электроснабжения с соб-



ственными электростанциями и узлами примыкания к энергосистеме, с целью определения экономически целесообразного потребления мощности от внешнего источника и выработки электроэнергии местными генерирующими электростанциями.

Теоретическая часть исследования

Оптимизацию режимов промышленных систем электроснабжения, с целью определения оптимального соотношения мощностей между внешними и собственными источниками, предлагается осуществлять с использованием модифицированного метода динамического программирования и последовательного эквивалентирования. Данный подход позволяет задавать исходные данные для расчётов в табличной форме и ограничения в форме равенств и неравенств.

В детерминированной постановке задачи оптимизации формулируется следующим образом — найти минимум целевой функции:

$$Z_n = \sum_{j=1}^n [C_j(x_j) + C_{от,j}(x_j) + C_{\Delta P_j}(x_j) + C_{пр,j}(x_j)] \rightarrow \min, \quad (1)$$

где x_j — оптимальное управление (оптимальная мощность источников энергии) на j -м шаге; $C_j(x_j)$ — стоимость расхода пара на выработку электроэнергии при суммарной нагрузке системы электроснабжения $P_{нагр}$; $C_{от,j}(x_j)$ — стоимость расхода пара через отборы; $C_{\Delta P_j}(x_j)$ — стоимость потерь активной мощности ΔP_j в системе электроснабжения при заданной нагрузке $P_{нагр,j}(x_j)$; ΔP — величина потерь активной мощности в сети, МВт; $P_{нагр,j}(x_j)$ — активная нагрузка системы электроснабжения, МВт; $C_{пр,j}(x_j)$ — стоимость приобретаемой электроэнергии $P_{пр,j}$ при заданной нагрузке $P_j(x_j)$; $P_{пр,j}$ — мощность, приобретаемая из энергосистемы, заданная с использованием технико-экономической модели (ТЭМ) энергосистемы, МВт.

На целевую функцию накладываются независимые ограничения (2):

$$\begin{aligned} P_{i\min} &\leq P_i \leq P_{i\max}, \\ P_{нагр} &= \sum_{i=1}^n (P_i) - \Delta P + \sum_{j=1}^m (P_{пр,j}), \\ P_{пр,j\min} &\leq P_{пр,j} \leq P_{пр,j\max}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $P_{i\min}$ и $P_{i\max}$ — минимальная и максимальная величины активной мощности генераторов, соответствующие ТЭМ источников, МВт; n — общее число генераторов в энергоузле; m — число точек примыкания к энергосистеме; $P_{пр,j\min}$ и $P_{пр,j\max}$ — минимальная и максимальная величины активной мощности, принимаемой из энергосистемы, МВт.



При этом на целевую функцию накладываются зависимые ограничения в виде допустимых нагрузок на элементах сети и допустимых потерь напряжения:

$$\begin{aligned} U_{i\min} &\leq U_i \leq U_{i\max}, \\ S_{i\min} &\leq S_i \leq S_{i\max}. \end{aligned} \quad (3)$$

Рекуррентное уравнение, которому должна удовлетворять функция Z_n , будет выглядеть следующим образом:

$$Z_n(P_n) = \min_{x_n \in X_n} \{C_{n-1}[P_n - P_{\text{нагр},n}(x_n)] + C_n(x_n) + C_{\Delta P(n)}(x_n) + C_{\text{пр},n}(x_n)\}. \quad (4)$$

Уравнения состояния в результате управления x_n будут иметь вид:

$$P_n = P_{n-1} + P_{\text{нагр},n}(x_n) + \Delta P_n(x_n) + P_{\text{пр},(n-1)}. \quad (5)$$

При решении оптимизационной задачи, как видно из целевой функции (1), учтены потери мощности в распределительных сетях. Для этого разработан алгоритм, более подробно описанный в [14].

Для решения оптимизационной задачи с использованием метода динамического программирования разработана

техничко-экономическая модель источников электроэнергии промышленной системы электроснабжения (табл. 1). Данная модель представляет собой зависимость суммарной мощности нагрузки энергоузла $P_{\text{нагр}}$ от следующих факторов: мощности i -го генератора t -й электростанции; мощности приёма внешнего источника $P_{\text{пр}}$ при их числе m ; затрат на выработку, приём и передачу мощности Z в рассматриваемом энергоузле.

С целью оценки баланса мощности в энергоузле модель также учитывает потери активной мощности в рассматриваемой системе электроснабжения.

Для получения эквивалентной оптимизационной модели энергоузла разработан алгоритм (рис. 1). На основании предложенных подходов разработан программно-вычислительный комплекс (ПВК) КАТРАН-OptActivePower [15], при использовании которого можно осуществлять планирование нормальных, ремонтных и послеаварийных режимов работы источников электрической энергии промышленных энергоузлов.

Техничко-экономическая модель промышленного энергоузла

табл. 1

Параметр	Величина								
$P_{\text{нагр},j}$, МВт	$P_{\text{нагр},1}$			$P_{\text{нагр},2}$			...	$P_{\text{нагр},j}$	
P_{it} , МВт	$P_{1,1}$	...	P_{it}	$P_{1,1}$	...	P_{it}	...	$P_{1,1}$	...
$P_{\text{пр},k}$, МВт	$P_{\text{пр},1}$	...	$P_{\text{пр},m}$	$P_{\text{пр},1}$	...	$P_{\text{пр},m}$	...	$P_{\text{пр},1}$	...
ΔP_j , МВт	ΔP_1			ΔP_2			...	ΔP_j	
Z_i , млн руб.	Z_1			Z_2			...	Z_j	

Результаты расчёта (фрагмент модели)

табл. 2

Параметр	Величина								
$P_{\text{нагр},j}$, МВт	896,63			899,5			...	927,48	
P_{it} , МВт	570			570			...	562	
$P_{\text{пр},k}$, МВт	137	77	127	138	78	128	...	130	120
ΔP_j , МВт	14,37			14,5			...	14,52	
Z_i , млн руб.	2 600 408,5			2 615 776,1			...	2 639 951,5	

Рекомендуемые загрузки i -го генератора местных электростанций

табл. 3

$P_{\text{нагр},j}$, МВт	P_{it} , МВт: ТЭЦ								ЦЭС								ПВЭС-1				ПВЭС-2			
	ТТ-1	ТТ-4	ТТ-2	ТТ-3	ТТ-5	ТТ-6	ТТ-8	ТТ-6	ТТ-4a	ТТ-4б	ТТ-7	ТТ-5	ТТ-2	ТТ-1	ТТ-3	ТТ-2	ТТ-1	ТТ-1	ТТ-2	ТТ-3	ТТ-4			
896,63	50	57	50	50	57	57	25	25	6	6	25	25	12	12	25	6	4	35	27	7	9			
899,50	50	57	50	50	57	57	25	25	6	6	25	25	12	12	25	6	4	35	27	7	9			
901,65	50	57	50	50	57	57	25	25	6	6	25	25	12	12	25	6	4	35	27	7	9			
902,50	50	57	50	50	57	57	25	25	6	6	25	25	12	12	25	6	4	35	27	7	9			
903,78	50	57	50	50	57	57	25	25	6	6	25	25	12	12	25	6	4	35	27	7	9			
904,49	50	57	50	50	57	57	25	25	6	6	25	25	12	12	25	6	4	35	27	7	9			
905,48	50	57	50	50	57	57	25	25	6	6	25	25	12	12	25	6	4	35	27	7	9			
908,47	50	57	50	50	57	57	25	25	6	6	25	25	12	12	25	6	4	35	27	7	9			
911,59	26	57	50	50	57	57	25	25	6	6	25	25	12	12	25	6	4	35	27	7	9			
917,52	32	57	50	50	57	57	25	25	6	6	25	25	12	12	25	6	4	35	27	7	9			
927,48	42	57	50	50	57	57	25	25	6	6	25	25	12	12	25	6	4	35	27	7	9			

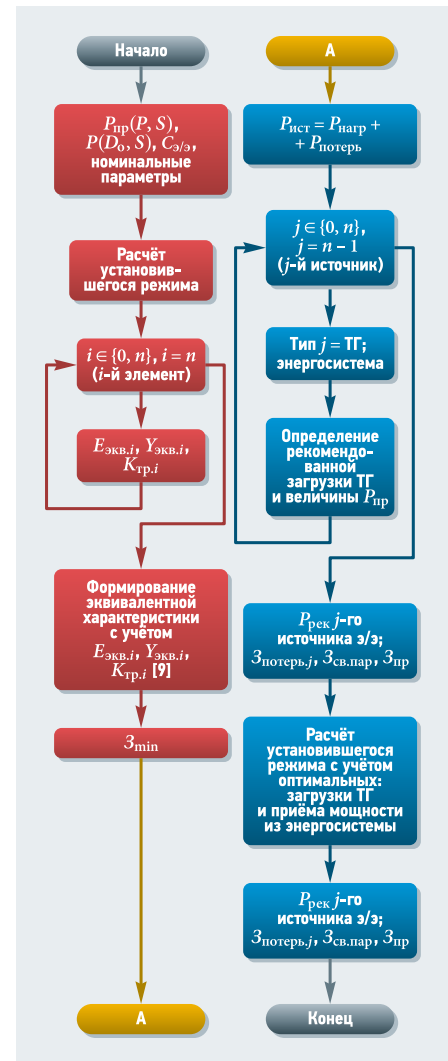


Рис. 1. Алгоритм оптимизации режимов системы электроснабжения с собственными и внешними источниками электроэнергии

Практическая часть исследования

Исследования проводились в условиях системы электроснабжения, структурная схема которой приведена на рис. 2. Узел получает питание от трёх собственных крупных электростанций (ТЭЦ, ЦЭС, ПВЭС), а также от трёх внешних источников: ПС «Бекетово», Троицкая ГРЭС, Ириклинская ГРЭС.

На основании описанного подхода с использованием [15] осуществлён поиск оптимальных режимов работы источников электроэнергии в условиях рассматриваемого объекта. Определены экономически целесообразные величины приёма мощности из энергосистемы, рекомендуемые загрузки генераторов. Фрагмент полученной оптимизационной модели приведён в табл. 2. С целью упрощения представления расчётов в строчке с рекомендуемыми нагрузками генераторов собственных электростанций приведена суммарная выработка электростанций рассматриваемого энергоузла.

Оптимальные загрузки i -го генератора t -й электростанции подробно приведены в табл. 3.

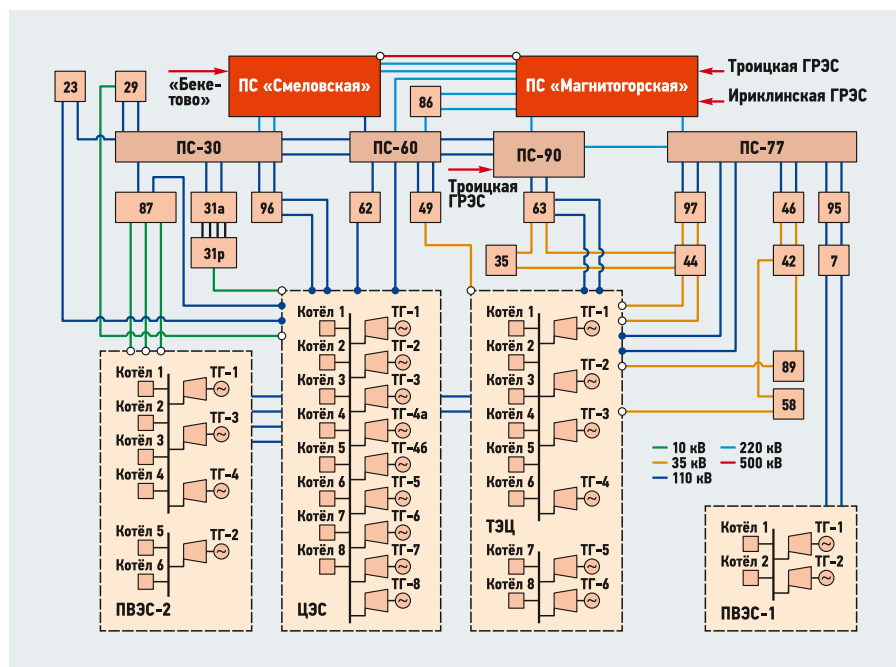


Рис. 2. Структурная схема промышленного энергоузла

Кроме того, полученные результаты для всего диапазона нагрузок энергоузла приведены на рис. 3. На данном графике отображена зависимость рекомендуемых нагрузок источников энергоузла от возможной мощности нагрузки (при расчётах также учтены потери мощности в балансе, однако на графике они определяются путём расчёта разницы суммарной выработки мощностей источников и мощности нагрузки).

На основании полученных зависимостей можно сделать вывод о том, что большое влияние на изменение мощности, принимаемой из системы, оказывает нагрузка, электрически близкая к ней, что объясняется учётом потерь мощности в распределительных сетях, а следовательно, и их влиянием на баланс мощности в энергоузле.

Заключение

Разработанный подход, реализованный в оригинальном программном продукте, позволяет определить оптимальное соотношение между покупаемой и собственной мощностью промышленного энергоузла. Применение метода динамического программирования обеспечивает поиск оптимальных решений на любом этапе оптимизации и позволяет определить набор экономически целесообразных управлений для всех источников электроэнергии рассматриваемого энергоузла.

С использованием ПВК можно осуществлять планирование нормальных, ремонтных и послеаварийных режимов работы источников электроэнергии

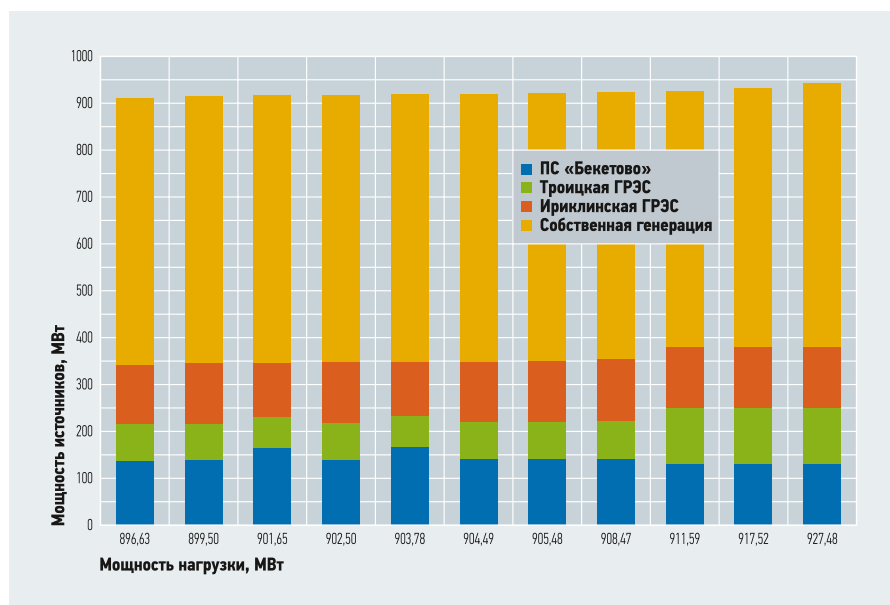


Рис. 3. Зависимость мощности источников электроэнергии от нагрузки

Подход позволяет прогнозировать нормальные, ремонтные и послеаварийные режимы работы промышленной системы электроснабжения не только с точки зрения надёжности, но и учитывая экономическую составляющую.

Разработанный программный продукт применим для решения задач диспетчерских служб энергохозяйства промышленного предприятия с собственными электростанциями.

1. Алябшева Т.М., Моржин Ю.И., Протопопова Т.Н., Цветков Е.В. О методах оптимизации режимов энергосистем и энергообъединений // Электрические станции. 2005. № 1. С. 44–49.
2. Wang T., Yuan G., Zhu L., Yu T. Reactive power optimization of electric power system incorporating wind power based on Parallel Immune Particle Swarm Optimization. The 26th Chinese Control and Decision Conference (CCDC 2014). Changsha, China. 2014. Pp. 1064–1068.
3. Wang C., Cheng H.Z., Yao L.Z. Reactive power optimization by plant growth simulation algorithm. The Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT 2008). Nanjing, China. 2008. Pp. 771–774.
4. Mate N., Bhongade S. Automatic generation control of two-area ST-thermal power plant optimized with Grey Wolf optimization. The IEEE 7th Power India International Conference (PIICON 2016). Bikaner, India. 2016. Pp. 1–6.
5. Малафеев А.В., Кочкина А.В., Панова Е.А. Оптимальное распределение мощностей между генераторами электростанций промпредприятия при длительном плановом ремонте оборудования питающих сетей // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова, 2012. № 4. С. 78–81.
6. Варганова А.В. Алгоритм внутростанционной оптимизации режимов работы котлоагрегатов и турбогенераторов промышленных электростанций // Промышленная энергетика, 2018. № 1. С. 17–22.
7. Щинников П.А., Боруш О.В., Зыков С.В. Экспериментальные исследования и оптимизация режимов работы ТЭЦ. — Новосибирск: НГТУ, 2019. 203 с.
8. Wei Tang. Chaotic optimization algorithm based on power function carrier for economic dispatch of power plant. The 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, China. 2006. Pp. 7527–7531.
9. Li J., Gu J., Niu C. The operation optimization based on correlation analysis of operation parameters in power plant. The IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID 2008). Wuhan, China. 2008. Pp. 138–141.
10. Левит Г.Т. Оптимизация управления топичными режимами паровых котлов, оснащённых мельницами-вентиляторами // Теплоэнергетика, 2000. № 8. С. 43–46.
11. Малафеев А.В., Щербакова В.С., Богун В.К. Получение эквивалентной расходной характеристики заводской электростанции при нечёткой оптимизации режима системы электроснабжения / Повышение надёжности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: Межвуз. сб. науч. трудов (с межд. участ.). — Уфа, 2018. С. 191–194.
12. Аракелян Э.К., Кормилицын В.И., Самаренко В.Н. Оптимизация режимов оборудования ТЭЦ с учётом экологических ограничений // Теплоэнергетика, 1992. № 2. С. 29–33.
13. Иванов Н.С., Беспалов В.И., Лопатин Н.С. Математическая модель оптимизации краткосрочных режимов работы ТЭЦ в условиях конкурентного рынка // Известия ТПУ, 2008. Т. 313. № 4. С. 37–40.
14. Малафеев А.В., Игуменцев В.А., Хламова А.В. Алгоритм оптимизации распределения активной мощности между электростанциями промышленного предприятия и узлами связи с энергосистемой с учётом потерь в распределительной сети // Промышленная энергетика, 2011. № 9. С. 16–21.
15. КАТРАН-OptActivePower. Свид-во о гос. рег-ции № 2019618397 от 01.07.2019 / А.В. Варганова, А.В. Малафеев. Правообл.: МГТУ им. Г.И. Носова; заявл. 07.06.2019; опубл. 01.07.2019.

References — see page 78.

Optimization model of power sources of an industrial power supply. Pp. 68–71.

Alexandra V. Varganova, postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University (Magnitogorsk city)

1. T.M. Aljabysheva, Ju.I. Morzhin, T.N. Protopopova, E.V. Tsvetkov. *O metodah optimizacii rezhimov jenergosistem i jenergoob'edinenij* [On the methods of optimization of modes of power systems and power interconnections]. *Elektricheskie stancii* ["Electric power stations" Magazine]. 2005. No. 1. Pp. 44–49. [In Russian]
2. T. Wang, G. Yuan, L. Zhu, T. Yu. Reactive power optimization of electric power system incorporating wind power based on parallel immune particle swarm optimization. The 26th Chinese Control and Decision Conference (CCDC 2014). Changsha, China. 2014. Pp. 1064–1068.
3. C. Wang, H.Z. Cheng, L.Z. Yao. Reactive power optimization by plant growth simulation algorithm. The Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing, China. 2008. Pp. 771–774.
4. N. Mate, S. Bhongade. Automatic generation control of two-area ST-thermal power plant optimized with Grey Wolf optimization. The IEEE 7th Power India International Conference (PII-CON 2016). Bikaner, India. 2016. Pp. 1–6.
5. A.V. Malafeev, A.V. Kochkina, E.A. Panova. *Optimal'noe raspredelenie moshhnostej mezhdu generatoremi jelektrostantsij promyshlennogo predpriyatija pri dlitel'nom pozaznom remonte oborudovaniya pitajushhij setej* [Optimal distribution of power between the generators of power plants of an industrial enterprise during long-term phase-by-phase repair of power supply network equipment]. *Vestnik MGTU* [Bulletin of the Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012. No. 4. Pp. 78–81. [In Russian]
6. A.V. Varganova. *Algoritmy vnutristancionnoj optimizacii rezhimov raboty kotloagregatov i turbogeneratorov promyshlennykh jelektrostantsij* [Algorithm for in-plant optimization of operating modes of boilers and turbine generators of industrial power plants]. *Promyshlennaja jenergetika* ["Industrial power engineering" Magazine]. 2018. No. 1. Pp. 17–22. [In Russian]
7. P.A. Shhinnikov, O.V. Borush, S.V. Zykov. *Jekzegeticheskie issledovaniya i optimizacija rezhimov raboty TJeC* [Exegetic research and optimization of operating modes of a combined heat and power plant]. Novosibirsk. NGTU [Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University]. 2019. 203 p. [In Russian]
8. Wei Tang. Chaotic optimization algorithm based on power function carrier for economic dispatch of power plant. The 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, China. 2006. Pp. 7527–7531.
9. J. Li, J. Gu, C. Niu. The operation optimization based on correlation analysis of operation parameters in power plant. The International Symposium on Computational Intelligence and Design. Wuhan, China. 2008. Pp. 138–141.
10. G.T. Levit. *Optimizacija upravlenija topochnymi rezhimami parovykh kotlov, osnashhennykh mel'nicami-ventiljatorami* [Optimization of control of combustion modes of steam boilers equipped with mills-fans]. *Teplotjenergetika* ["Heat power engineering" Magazine]. 2000. No. 8. Pp. 43–46. [In Russian]
11. A.V. Malafeev, V.S. Shherbakova, V.K. Bogush. *Poluchenie jekvivalentnoj rashodnoj harakteristiki zavodskoj jelektrostantsij pri nechetkoj optimizacii rezhima sistemy jelektrosnabzhenija* [Obtaining an equivalent consumption characteristic of a plant power plant with fuzzy optimization of the power supply system mode]. *Povyshenie nadezhnosti i jenergojeffektivnosti jelektrotehnicheskikh sistem i kompleksov: Mezhd. sb. nauchn. trudov (s mezhd. uchast.)* [Improving the reliability and energy efficiency of electrical systems and complexes: An interuniversity collected volume of scientific papers (with international participation)]. Ufa. 2018. Pp. 191–194. [In Russian]
12. Je.K. Arakeljan, V.I. Kormilicyn, V.N. Samarenko. *Optimizacija rezhimov oborudovaniya TJeC s uchetom jekologicheskikh ogranichenij* [Optimization of the modes of the combined heat and power plant equipment taking into account environmental restrictions]. *Teplotjenergetika* ["Heat power engineering" Magazine]. 1992. No. 2. Pp. 29–33. [In Russian]
13. N.S. Ivanov, V.I. Bepalov, N.S. Lopatin. *Matematicheskaja model' optimizacii kratkosrochnykh rezhimov raboty TJeC v uslovijah konkurentnogo rynka* [Mathematical model of optimization of short-term operating modes of a combined heat and power plant in a competitive market]. *Izvestija TPU* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]. 2008. Vol. 313. No. 4. Pp. 37–40. [In Russian]
14. A.V. Malafeev, V.A. Igumenshhev, A.V. Hlamova. *Algoritmy optimizacii raspredelenija aktivnoj moshhnosti mezhdu jelektrostantsijami promyshlennogo predpriyatija i uzlami svyazi s jenergosistemoj s uchetom poter' v raspredelitel'noj seti* [Algorithm for optimizing the distribution of active power between power plants of an industrial enterprise and nodes of communication with the power system, taking into account losses in the distribution network]. *Promyshlennaja jenergetika* ["Industrial power engineering" Magazine]. 2011. No. 9. Pp. 16–21. [In Russian]
15. KATRA-OptActivePower. The state registration certificate No. 2019618397 dated July 1, 2019. A.V. Varganova, A.V. Malafeev. Copyright: Nosov Magnitogorsk State Technical University. Decl. on June 7, 2019. Publ. on July 1, 2019. [In Russian]