

Варганова А.В.<sup>1</sup>, Джагаров Н.Ф.<sup>2</sup><sup>1</sup>Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова<sup>2</sup>Высшее военно-морское училище имени Николы Вапцарова, г. Варна, Болгария

## КОМПЛЕКСНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Работа посвящена одному из способов повышения эффективности управления промышленными электростанциями с применением программного продукта расчета и оптимизации их режимов. Как правило, решение задач оптимизации носит детерминированный характер, решаются частные задачи управления или повышения эффективности функционирования конкретного агрегата, участка. Авторами работы предлагается комплексный подход по поиску оптимальных режимов работы генерирующей электроустановки с целью их прогнозирования и определения наилучших вариантов для заданного времени эксплуатации. Подход ориентирован на одновременный поиск оптимальных режимов работы генераторов и котлоагрегатов, а также состава топливной смеси при условии минимума затрат на свежий пар, идущий на производственные и теплофикационные отборы, а также выработку электроэнергии. При разработке алгоритма учтены отличительные особенности схем электростанций, возможность применения нескольких видов топлива, сезонность работы, а также остаточный ресурс оборудования. Алгоритм расчета основан на методе динамического программирования в сочетании с методом последовательного эквивалентирования и реализован в модулях программного продукта КАТРАН. Исходными данными для расчета являются технико-экономические модели энергооборудования, заданные в табличной форме и отражающие эксплуатационные ограничения. Результаты работы предназначены для служб планирования режимов работы промышленных систем электроснабжения, а также для технических отделов электростанций. В работе приведен пример расчета в условиях действующей системы электроснабжения промышленного предприятия, рассчитаны оптимальные режимные карты котлов и диаграммы мощностей генераторов, а также спрогнозированы возможные послеаварийные режимы работы теплоэнергетического оборудования и их эффективные загрузки в данных условиях.

**Ключевые слова:** тепловая электростанция, турбогенератор, энергетический котел, промышленный энергоузел, собственная генерация, вторичные энергоресурсы, оптимизация, энергоэффективность, динамическое программирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования в области повышения эффективности функционирования объектов электроэнергетики связаны с необходимостью сокращения затрат на производство, передачу и распределение электроэнергии.

Разработано и внедрено большое число подходов, направленных на выполнение мероприятий по энерго- и ресурсосбережению в области электроэнергетики [1].

Часть работ решает технические задачи в условиях систем электроснабжения, другая направлена на применение математического аппарата теории оптимизации с целью разработки алгоритмического и программного обеспечения, позволяющего улучшить показатели работы промышленных систем электроснабжения.

В работах [2, 3] приведено одно из возможных технических решений, позволяющих сократить потери мощности в распределительных сетях за счет установки мощных компенсирующих устройств. Ту же задачу авторы статьи [4] ставят в условиях энергоузлов с ветроэлектростанциями. Определение экономически и технически целесообразных режимов систем электроснабжения достигается также за счет определения оптимального уровня напряжения в сетях [5].

Большое число задач решается уже на электростанциях [6] при производстве электроэнергии и тепла, учитывая при этом особенности режимов работы распределительных сетей энергоузла [7] и экологические факторы [8].

Ряд работ посвящен моделированию электростанций, с целью поиска наилучших режимов, мониторинга

параметров работы установок. Авторами работы [9] предлагается применять сочетание подхода нейронных сетей и вейвлет-моделей с целью разработки модели электростанции, что обеспечит построение высокопроизводительной системы по мониторингу и контролю параметров режимов электростанции. При разработке моделей электростанций должны обязательно соблюдаться ограничения по их допустимым режимам [10, 11].

В [12, 13] разработаны топливные модели электростанций, позволяющие осуществлять определение запасов топлива и их потребления с использованием специализированного программного обеспечения.

При разработке систем управления и мониторинга на электростанциях обязательно должен быть применен принцип избыточности [14] с целью обеспечения надежной работы электроустановки. Отельные задачи решаются при эксплуатации котельных установок [15], генераторов [16] или при решении комплексной задачи оптимизации при комбинированном производстве тепла и электроэнергии [17, 18].

Решение оптимизационных задач в условиях промышленных тепловых электростанций имеет большое число путей и должно быть адаптировано к характерным условиям промышленного энергоузла. Универсального подхода для повышения эффективности функционирования электростанций нет, принимать их нужно только для конкретного объекта и это обуславливает большое число методов, методик, алгоритмов по решению данной задачи.

В данной работе предлагается осуществлять оптимизацию режимов работы заводских электростанций за счет применения метода комплексной оптимизации режимов котлоагрегатов и турбогенераторов.

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКИ  
ЦЕЛЕСООБРАЗНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Проведение комплексной оптимизации режимов работы заводской ТЭЦ включает в себя одновременный поиск оптимальной загрузки генераторов, котлоагрегатов и расходов первичных энергоносителей электростанции при условии соблюдения допустимых эксплуатационных режимов.

Предлагаемый алгоритм основан на сочетании метода последовательного эквивалентирования динамического программирования [19].

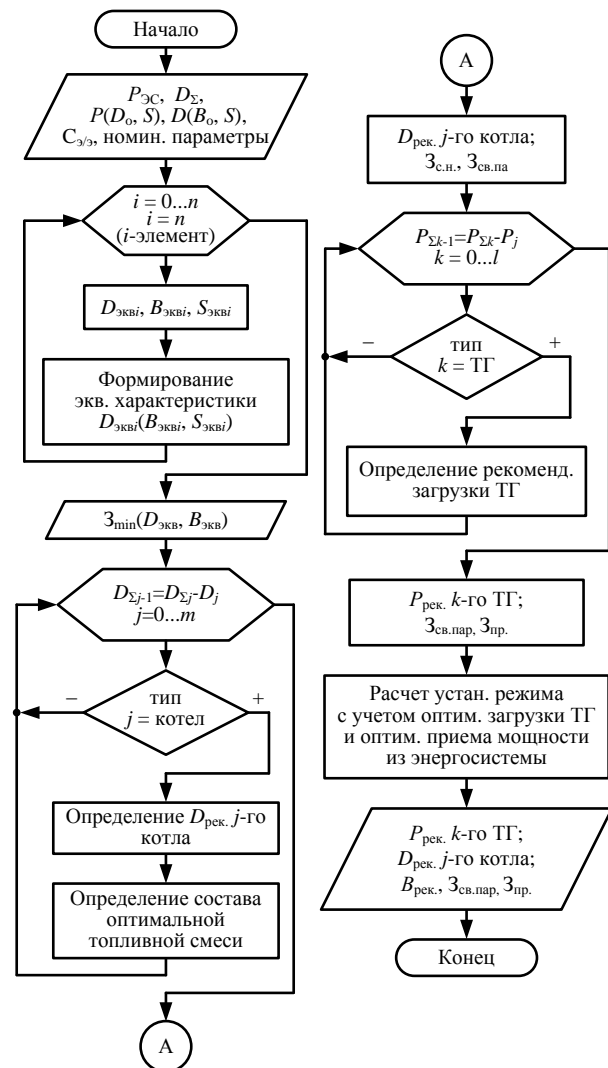
Общий вид целевой функции комплексной оптимизации имеет вид:

$$\begin{cases} Z_n = \sum_{j=1}^n \left( \sum_{k=1}^m (C_{k,j}(y_j) + C_{от k,j}(y_j)) \right) \rightarrow \min, \\ D_{\Sigma} = P_{ЭС} \cdot d_{ЭС} + D_T + D_{П}, \\ P_{ЭС} = \sum_{k=1}^l P_k(D_k), \\ B_{\Sigma} = \sum_{k=1}^m B_k(D_m), \end{cases} \quad (1)$$

где  $y_j$  – оптимальное управление на  $j$ -м шаге;  $C_{k,j}(y_j)$  – стоимость расхода энергоносителя, идущего на выработку пара, необходимого для выработки мощности при суммарной нагрузке источников  $P_T$ ;  $P_T$  – суммарная мощность турбогенераторов, получающих пар от одного паропровода;  $C_{от k,j}(y_j)$  – стоимость расхода пара через отборы;  $n$  – число котлов на электростанции, подключенных к одному паропроводу;  $m$  – общее число различных видов первичных энергоносителей, используемых на рассматриваемой электростанции;  $P_{ЭС}$  – суммарная выработка активной мощности генераторами электростанции, МВт;  $d_{ЭС}$  – удельный расход пара на выработку 1 МВт·ч электроэнергии, т/МВт·ч;  $D_T$ ,  $D_{П}$  – теплофикационный и производственный отбор, т/ч;  $B_{\Sigma}$  – суммарный расход энергоносителей, т у.т.

На целевую функцию накладываются эксплуатационные ограничения по допустимым величинам паропроизводительности, температуре перегретого пара, давления в топке котлоагрегата, мощности на клеммах генератора. Кроме того, обязательно осуществляются проверки параметров электрического режима на допустимые потери напряжения и токов, протекающих через элементы схемы.

Блок-схема алгоритма разработки приведена на **рис. 1**. Исходными данными для расчета являются технико-экономические модели котлов и генераторов, представляющие собой зависимости паропроизводительности (для котлов) и мощности (для турбогенераторов) от расхода энергоносителя (для котлов – энергетическое топливо, для турбогенераторов – свежий пар) и себестоимости единицы свежего пара [20].



**Рис. 1. Блок-схема алгоритма комплексной оптимизации режимов работы заводских электростанций**

Отличительной особенностью предложенного подхода является одновременный учет параметров тепловых и электрических режимов при поиске оптимального режима генерирующей установки.

Разработанные алгоритмы реализованы в оригинальном программном продукте КАТРАН [21, 22]. Структурная схема ПВК приведена на **рис. 2**.

Модуль оптимизации состоит из двух структурных элементов:

- оптимизация по активной мощности – осуществляет определение оптимальной активной мощности генераторов;
- оптимизация по тепловой нагрузке – расчет оптимальной загрузки котлов и определения экономически целесообразного состава топливной смеси для топок котлов;
- выдача рекомендаций по работе электростанций – определение комплексного решения по нагрузке генераторов и котлов электростанции при возможной выработке мощности электроустановки, расчет показателей эффективности электростанции (суммарные затраты на генерацию, затраты на топливо единичного котлоагрегата, себестоимость тонны свежего пара).

Вывод данных осуществляется в MS Excel, что обеспечивает дальнейшую необходимую обработку результатов оптимизационного расчета.

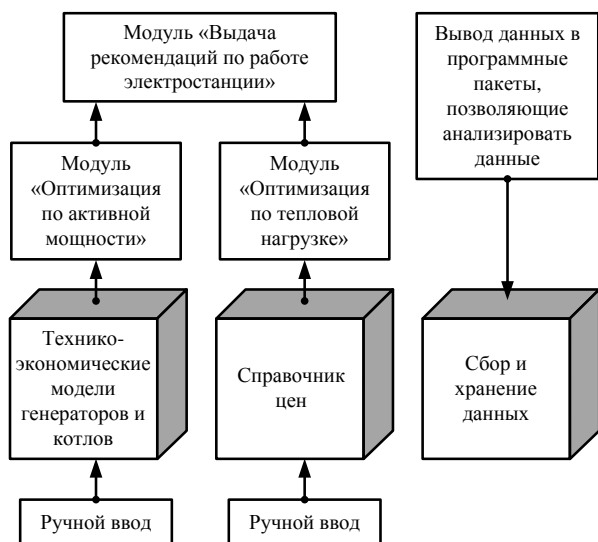


Рис. 2. Структурная схема модуля «Оптимизация» ПКВ КАТРАН

#### ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчеты проводились в условиях действующей системы электроснабжения промышленного предприятия с собственными электростанциями.

На рис. 3 приведена упрощенная электрическая схема, на рис. 4 тепловая схема рассматриваемой электростанции, созданная в оригинальном программном продукте КАТРАН [21, 22].

Котлы электростанции работают на смеси доменного и природного газов.

В результате оптимизационных расчетов получены оптимальные загрузки котлоагрегатов (табл. 1) и турбогенераторов (табл. 2) промышленных электростанций в нормальных, ремонтных и/или послеаварийных режимах работы, а также определен оптимальный состав топливной смеси в зависимости от суммарной выработки активной мощности электростанций.

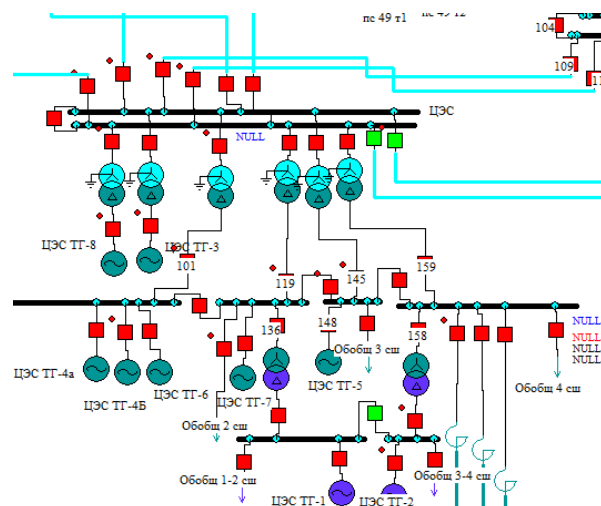


Рис. 3. Упрощенная электрическая схема промышленной электростанции (фрагмент схемы исследуемого энергоузла)

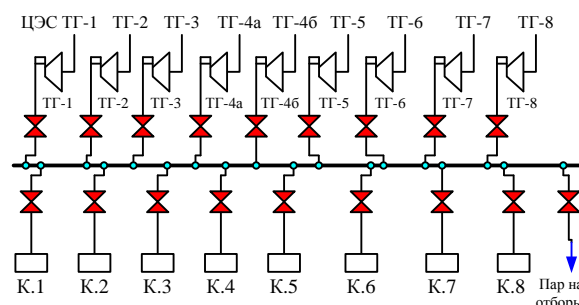


Рис. 4. Упрощенная тепловая схема промышленной электростанции

На основании полученных значений можно прогнозировать затраты на выработку тепла и электроэнергии для возможных суммарных выработок электростанций в нормальных, ремонтных и послеаварийных режимах (рис. 5).

Таблица 1

Фрагмент эквивалентной режимной карты котла рассматриваемой тепловой промышленной электростанции

Суммарная выработка по ЭС, МВт	Параметр	Станционный номер котла							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Нормальная схема									
173	$D$ , т/ч	90	170	170	150	90	210	121	171
	$B_{ПГ}$ , тыс. м <sup>3</sup>	5,6	8	9,8	0,6	6,1	12,3	2,5	11
	$B_{ДГ}$ , тыс. м <sup>3</sup>	85	100	80	100	36	60	90	85
174	$D$ , т/ч	90	170	170	150	90	210	121	176
	$B_{ПГ}$ , тыс. м <sup>3</sup>	5,6	8	9,8	0,6	6,1	12,3	2,5	11
	$B_{ДГ}$ , тыс. м <sup>3</sup>	85	100	80	100	36	60	90	85
...									
213	$D$ , т/ч	160	170	162	150	150	210	190	170
	$B_{ПГ}$ , тыс. м <sup>3</sup>	8,4	8	9,8	0,6	9,6	12,3	12	9,5
	$B_{ДГ}$ , тыс. м <sup>3</sup>	90	100	80	100	38	60	90	55
214	$D$ , т/ч	160	170	170	150	150	210	190	188
	$B_{ПГ}$ , тыс. м <sup>3</sup>	8,4	8	9,8	0,6	9,6	12,3	12	11
	$B_{ДГ}$ , тыс. м <sup>3</sup>	90	100	80	100	38	60	90	85
Ремонтный режим работы (отключение ТГ-7 и котла №7)									
135	$D$ , т/ч	90	170	146	150	90	170	0	140
	$B_{ПГ}$ , тыс. м <sup>3</sup>	5,6	8	7,5	0,6	6,1	7,5	0	9,5
	$B_{ДГ}$ , тыс. м <sup>3</sup>	85	100	85	100	36	70	0	55
136	$D$ , т/ч	90	170	150	150	90	170	0	140
	$B_{ПГ}$ , тыс. м <sup>3</sup>	5,6	8	7,5	0,6	6,1	7,5	0	9,5
	$B_{ДГ}$ , тыс. м <sup>3</sup>	85	100	85	100	36	70	0	55
...									
174	$D$ , т/ч	160	170	148	150	149	210	0	170
	$B_{ПГ}$ , тыс. м <sup>3</sup>	8,4	8	7,5	0,6	7,7	12,3	0	9,5
	$B_{ДГ}$ , тыс. м <sup>3</sup>	90	100	85	100	38	60	0	55

Фрагмент эквивалентной оптимальной карты мощностей генераторов рассматриваемой тепловой промышленной электростанции

Суммарная выработка по ЭС, МВт	Рекомендуемая мощность, МВт								
	Станционный номер турбогенератора								
	ТГ-1	ТГ-2	ТГ-3	ТГ-4а	ТГ-4б	ТГ-5	ТГ-6	ТГ-7	ТГ-8
<b>Нормальная схема</b>									
173	10	10	35	5	5	23	23	23	39
174	10	10	35	5	5	23	23	23	40
...									
213	13	13	43	6	5	30	30	30	43
214	13	13	43	6	6	30	30	30	43
<b>Ремонтный режим работы (отключение ТГ-7 и котла №7)</b>									
132	8	8	30	5	5	23	23	0	30
135	8	8	30	5	5	26	23	0	30
136	8	8	30	5	5	27	23	0	30
....									
174	13	13	38	6	6	30	30	КР	38

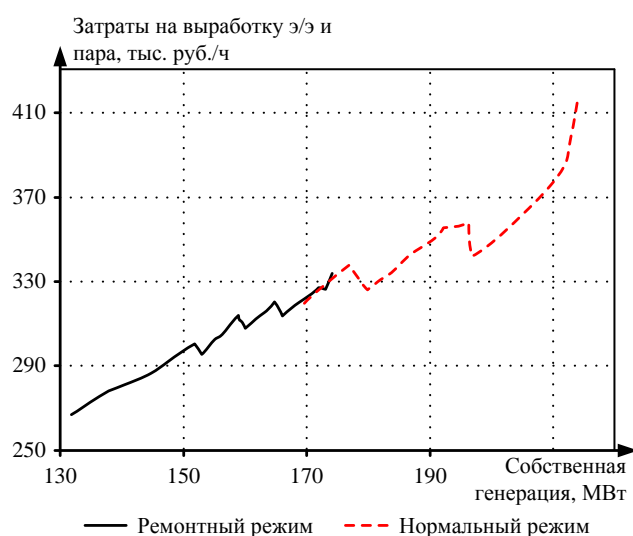


Рис. 5. Суммарные затраты на генерацию тепловой и электрической мощности нормального режима работы электростанции

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный программный продукт позволяет осуществлять комплексную оптимизацию режимов работы промышленных электростанций, учитывая при этом сезон ТЭЦ, остаточный ресурс оборудования, вид используемого топлива. Полученные оптимальные значения мощности генераторов и паропроизводительностей котлов позволяют осуществлять экономически целесообразные управляющие воздействия на электростанциях и тем самым повышать эффективность их работы в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы.

Результаты исследования применимы для решения задач технических отделов, отделов планирования энергохозяйств промышленного предприятий

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Варганова А.В. О методах оптимизации режимов работы электроэнергетических систем и сетей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 3. С. 76-85.
- Khrumshin T.R., Kornilov G.P., Murzikov A.A., Karandaev A.S. and Khrumshin V.R. "Mathematical model of the static reactive power compensator," 2014 International Con-

ference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), Saratov, 2014, pp. 418-425.

- Khrumshin T.R., Abdulvelev I.R., Kornilov G.P. and Krubcov D.S. "Electromagnetic compatibility of high power STATCOM in asymmetrical conditions," 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Omsk, 2015, pp. 1-6.
- T. Wang, G. Yuan, L. Zhu and 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 (2014 CCDC), Changsha, 2014, pp. 1064-1068, doi: 10.1109/CCDC.2014.6852322.
- Z. Jinhua, "Optimization Study on Voltage Level and Transmission Capacity," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, no. 1, pp. 193-197, Feb. 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2008.2008609.
- Блинов А.Я. Обеспечение комплексных мер по улучшению технико-экономических показателей электростанции // Энергетик. 1975. № 2. С. 6-8.
- Dzobo O. "Virtual power plant energy optimisation in smart grids," 2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA), Bloemfontein, South Africa, 2019, pp. 714-718.
- Аракелян Э.К., Кормилицын В.И., Самаренко В.Н. Оптимизация режимов оборудования ТЭЦ с учетом экологических ограничений // Теплоэнергетика. 1992. № 2. С. 29-33.
- Осика Л.К., Журавлёв В.С. Требования к виртуальным моделям тепловых электростанций и инструментам их создания // Электрические станции. 2014. № 1(990). С. 2-8.
- Donne M.S., Pike A.W. and Savry R. "Application of modern methods in power plant simulation and control," in Computing & Control Engineering Journal, vol. 12, no. 2, pp. 75-84, April 2001, doi: 10.1049/cce:20010205.
- A. Aminzadeh, A.A. Safavi, A.R. Seifi. "Development of a hybrid simulator of a fossil fuel steam power plant", European Control Conference (ECC) 2003, pp. 1905-1910, 2003.
- Бондаренко Л.В. Методы и модели управления материальными запасами топлива на тепловых электростанциях // Известия ТРТУ. 2006. № 15 (70). С. 119-122.
- Y. Li and R. Li, "Simulation and Optimization of the Power Station Coal-Fired Logistics System Based on Witness Simulation Software," 2008 Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System, Guangzhou, 2008, pp. 394-398, doi: 10.1109/PEITS.2008.103.
- Eryurek E., Upadhyaya B.R. and Erbay A.S. "Software-based fault-tolerant control design for improved power plant operation," Proceedings of IEEE Symposium on Computer-

- Aided Control Systems Design (CACSD)*, Tucson, AZ, USA, 1994, pp. 585-590, doi: 10.1109/CACSD.1994.288874.
15. Левит Г.Т. Режимные карты и оптимизация управления котельными установками // *Электрические станции*. 1998. № 5. С. 26-32.
  16. Повышение максимальной электрической мощности тепловых электрических станций, содержащих в своем составе паросиловые и парогазовые энергоблоки / В.В. Шапошников, Б.В. Бирюков, Д.Н. Батько, Я.О. Михалко // *Промышленная энергетика*. 2020. №4. С. 19-25.
  17. Yuanhang Dai, Lei Chen, Yong Min, Qun Chen, Kang Hu, JunhongHao, Yiwei Zhang, FeiXu, "Dispatch Model of Combined Heat and Power Plant Considering Heat Transfer Process", *Sustainable Energy IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 3, pp. 1225-1236, 2017.
  18. Varganova A.V. and Shemetov A.N. "Integrated in-Station Optimization of Industrial Thermal Power Plants," *2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Chelyabinsk, Russia, 2019, pp. 438-442, doi: 10.1109/URALCON.2019.8877662.
  19. Варганова А.В. Алгоритм внутростанционной оптимизации режимов работы котлоагрегатов и турбогенераторов промышленных электростанций // *Промышленная энергетика*. 2018. № 1. С. 17-22.
  20. 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.
  21. А.с. 2019618345 Российская Федерация, КАТРАН-OptHeatPower / Варганова А.В., Малафеев А.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2019616881; заявл. 07.06.2019; опубл. 28.06.19.
  22. А.с. 2019618397 Российская Федерация. КАТРАН-OptActivePower / Варганова А.В., Малафеев А.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2019616954; заявл. 07.06.2019; опубл. 01.07.19.

Поступила в редакцию 30 сентября 2020 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### INTEGRATED OPTIMIZATION OF INDUSTRIAL THERMAL POWER PLANTS CONDITIONS

Aleksandra V. Varganova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Industrial Electric Power Supply Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aleksandra-khlamova@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4675-7511>.

Nikolay F. Djagarov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electrical Engineering, Nikola Vaptsarov Naval Academy, Varna, Bulgaria. E-mail: n.dzhagarov@naval-acad.bg. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4234-4659>.

The paper is devoted to one of the ways to improve the efficiency of industrial power plants management using a software product for calculating and optimizing of their modes. As a rule, the solution of optimization problems is of the deterministic nature; particular problems of control or increasing the efficiency of the functioning of a particular unit or section are solved. The authors of the paper propose an integrated approach to finding the optimal operating modes of a generating electrical installation in order to predict them and determine the best options for a given operating time. The approach is focused on the simultaneous search for optimal operating modes of generators and boilers as well as the composition of the fuel mixture, provided that the cost of fresh steam is minimized, which goes to production and heating extractions as well as electricity generation. When developing the algorithm, the distinctive features of power plant schemes, the possibility of using several types of fuel, the seasonality of operation, as well as the residual resource of the equipment were taken into account. The calculation algorithm is based on the dynamic programming method in combination with the sequential equivalent method and is implemented in the modules of the KATRAN software product. The initial data for the calculation are the technical and economic models of power equipment given in tabular form and reflecting the operational limitations. The results of the research work are intended for the planning services for the operating modes of industrial power supply systems as well as for the technical departments of power plants. The paper provides an example of a calculation under the conditions of an existing power supply system of an industrial enterprise, calculates the optimal operating maps of boilers and power diagrams of generators and predicts possible post-emergency modes of operation of heat and power equipment and their effective load in these conditions.

**Keywords:** thermal power plant, turbine generator, power boiler, industrial power center, in-house power generation, secondary energy resources, optimization, energy efficiency, dynamic programming.

#### REFERENCES

1. Varganova A.V. On the Methods of Optimization of Operating Modes of Electric Power Systems and Networks. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State University]. Series: Energy, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 76–85. (In Russian)
2. Khramshin T.R., Kornilov G.P., Murzikov A.A., Karandaev A.S. and Khramshin V.R. "Mathematical model of the static reactive power compensator," *2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*, Saratov, 2014, pp. 418-425.
3. Khramshin T.R., Abdulveleev I.R., Kornilov G.P. and Krubcov D.S. "Electromagnetic compatibility of high power STATCOM in asymmetrical conditions," *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Omsk, 2015, pp. 1-6.
4. T. Wang, G. Yuan, L. Zhu and 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 (2014 CCDC)*, Changsha, 2014, pp. 1064-1068, doi: 10.1109/CCDC.2014.6852322.
5. Z. Jinhua, "Optimization Study on Voltage Level and Transmission Capacity," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 193-197, Feb. 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2008.2008609.
6. Blinov A.Ya. Providing comprehensive measures to improve the technical and economic indicators of the power plant. *En-*

- ergetik [Power engineer], 1975, no. 2, pp. 6-8. (In Russian)
7. Dzobo O. "Virtual power plant energy optimisation in smart grids," *2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*, Bloemfontein, South Africa, 2019, pp. 714-718.
8. Arakelyan E.K., Kormilitsyn V.I. and Samarenko V.N. Optimization of the CHPP equipment modes taking into account environmental restrictions. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 1992, no. 2, pp. 29-33. (In Russian)
9. Osika L.K., Zhuravlev V.S. Requirements for virtual models of thermal power plants and tools for their creation. *Elektricheskie stancii* [Electric power plants], 2014, no. 1(990), pp. 2-8. (In Russian)
10. Donne M.S., Pike A.W. and Savry R. "Application of modern methods in power plant simulation and control," in *Computing & Control Engineering Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 75-84, April 2001, doi: 10.1049/cce:20010205.
11. A. Aminzadeh, A. A. Safavi, A. R. Seifi, "Development of a hybrid simulator of a fossil fuel steam power plant", *European Control Conference (ECC) 2003*, pp. 1905-1910, 2003.
12. Bondarenko L.V. Methods and models of fuel inventory management at thermal power plants. *Izvestia TRTU* [Proceedings of TRTU], 2006, no. 15(70), pp. 119-122. (In Russian)
13. Y. Li and R. Li, "Simulation and Optimization of the Power Station Coal-Fired Logistics System Based on Witness Simulation Software," *2008 Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System, Guangzhou*, 2008, pp. 394-398, doi: 10.1109/PEITS.2008.103.
14. Eryurek E., Upadhyaya B.R. and Erbay A.S. "Software-based fault-tolerant control design for improved power plant operation," *Proceedings of IEEE Symposium on Computer-Aided Control Systems Design (CACSD)*, Tucson, AZ, USA, 1994, pp. 585-590, doi: 10.1109/CACSD.1994.288874.
15. Levit G.T. Mode maps and optimization of control of boiler plants. *Elektricheskie stancii* [Electric power plants], 1998, no. 5, pp. 26-32. (In Russian)
16. Shaposhnikov V.V., Biryukov B.V., Batko D.N. and Mikhalko Ya.O. Increasing the maximum electric power of thermal power plants containing steam-power and steam-gas power units. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2020, no. 4, pp. 19-25. (In Russian)
17. Yuanhang Dai, Lei Chen, Yong Min, Qun Chen, Kang Hu, Junhong Hao, Yiwei Zhang, Fei Xu, "Dispatch Model of Combined Heat and Power Plant Considering Heat Transfer Process", *Sustainable Energy IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 3, pp. 1225-1236, 2017.
18. Varganova A.V. and Shemetov A.N. "Integrated in-Station Optimization of Industrial Thermal Power Plants," *2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Chelyabinsk, Russia, 2019, pp. 438-442, doi: 10.1109/URALCON.2019.8877662.
19. Varganova A.V. The Algorithm of the Intra-Station Unit Optimization of Operating Modes of Boiler Units and Turbo Generators for Industrial Power Plants. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2018, no. 1, pp. 17-22. (In Russian)
20. Kochkina A.V., Malafeev A.V., Kurilova N.A., Netupsky R.P. Construction of Technical and Economic Models of Auxiliary Turbine Generators and Boilers of a Power Plant. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2013, no. 21, pp. 247-252. (In Russian)
21. Varganova A.V., Malafeev A.V. KATRAN-Opt Active Power. Software RF, no. 2019618345, 2019. (In Russian)
22. Varganova A.V., Malafeev A.V. KATRAN-Opt Active Power. Software RF, no. 2019618397, 2019. (In Russian)

Варганова А.В., Джагаров Н.Ф. Комплексная оптимизация режимов работы промышленных тепловых электростанций // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 4(49). С. 11-16. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4\(49\)-11-16](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-11-16)

Varganova A.V., Djagarov N.F. Integrated Optimization of Industrial Thermal Power Plants Conditions. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 4(49), pp. 11-16. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4\(49\)-11-16](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-11-16)