

Краткие сообщения

Brief reports

Краткое сообщение

УДК 62-50

DOI: 10.14529/ctcr260209

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ НАГРУЗКИ ТУРБОАГРЕГАТОВ

О.В. Колесникова, kolesnikovaov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9421-4613>

А.Д. Мойсук, moysukad@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-0410-8477>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов на металлургических предприятиях, в частности, на их собственных электростанциях, является актуальным вопросом, так как приводит к снижению себестоимости основной продукции и росту конкурентоспособности предприятий. Рассмотрен метод оптимизации режимов работы турбоагрегатов электростанций. **Цель исследования** заключается в повышении энергетической эффективности режимов работы турбоагрегатов электростанций металлургических предприятий. **Материалы и методы.** Приведен метод оптимизации режимов работы турбоагрегатов по критерию минимума удельного расхода тепла с паром на выработку электроэнергии их блоком при обеспечении заданной общей электрической и тепловой нагрузки путем ее перераспределения между турбоагрегатами. При решении задачи оптимизации учитываются технологические ограничения, текущее техническое состояние турбоагрегатов, ремонтная программа, объемы потребляемых энергетических ресурсов и вырабатываемой энергетической продукции. В качестве математических моделей турбоагрегатов используются их индивидуальные энергетические характеристики, построение которых осуществляется на основе фактических данных эксплуатации с учетом нормативных данных (например, диаграммы режимов турбоагрегатов). **Результаты.** Приведен пример оптимизации режимов работы для блока четырех турбоагрегатов с использованием статистических данных эксплуатации. В результате оптимизации снижение удельного расхода тепла с паром на выработку электроэнергии блоком турбоагрегатов составило около 5 %. При этом ограничения, накладываемые на выработку электроэнергии, отпуск тепла в теплофикационный отбор отдельными турбоагрегатами и их блоком в целом, а также на потребление пара отдельными турбоагрегатами, выполнены. **Заключение.** Рассмотренный метод оптимизации позволяет перераспределить электрическую и тепловую нагрузку между турбоагрегатами при заданных ограничениях, что способствует снижению затрат на выработку электроэнергии. Метод реализован в качестве одной из функций автоматизированной системы управления энергетической эффективностью электростанции, основным назначением которой является повышение технико-экономических показателей работы электростанции. Перспективным направлением дальнейшей работы является разработка цифровых двойников турбоагрегатов для мониторинга и актуализации их энергетических характеристик в режиме реального времени.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, оптимизация, турбоагрегат, электростанция, распределение нагрузки

Для цитирования: Колесникова О.В., Мойсук А.Д. Метод оптимизации нагрузки турбоагрегатов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 2. С. 109–114. DOI: 10.14529/ctcr260209

METHOD OF TURBINE OPERATING MODES OPTIMIZATION

O.V. Kolesnikova, kolesnikovaov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9421-4613>

A.D. Moisuk, moisukad@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-0410-8477>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Enhancing the efficiency of fuel and energy resource utilization in metallurgical enterprises, particularly at their captive power plants, is a highly relevant issue. This is due to its direct impact on reducing the cost of primary production and increasing the overall competitiveness of these enterprises. Method of optimization of operation modes of turbine units of power plants is considered. **The purpose of the study** is to enhance the energy efficiency of the operating modes of turbine units of power plants of metallurgical enterprises. **Materials and methods.** A method is presented for optimizing the operating modes of turbine units. This method focuses on minimizing the specific heat consumption for electricity generation by block of turbine units, achieved through the redistribution of a given electrical and thermal load between them. The redistribution takes into account current technological constraints, the technical condition and shut-downs of equipment, the volumes of required energy resources and generated energy production. Individual energy characteristics of turbine units are used as their mathematical models. The construction of these characteristics is performed based on actual operational data, while taking into account regulatory data (e.g., turbine unit operating diagrams). **Results.** An example demonstrating the optimization of operating modes for a block of four turbine units, using statistical operational data, is provided. As a result of this optimization, the specific heat consumption for electricity generation by the turbine unit block was reduced by approximately 5%. All imposed constraints on electricity generation, heat supply from heat extraction by individual turbine units and their unit, as well as on steam consumption by individual turbine units, were satisfied. **Conclusion.** The presented optimization method enables the redistribution of electrical and thermal load between turbine units under given constraints, which contributes to reducing electricity generation costs. The method has been implemented as one of the functions of an automated power plant energy efficiency management system, whose primary purpose is to improve the power plant's technical and economic performance. A promising direction for further work involves the development of digital twins for turbine units to monitor and update their energy characteristics in real-time.

Keywords: energy efficiency, optimization, steam turbine, power plant, load distribution

For citation: Kolesnikova O.V., Moisuk A.D. Method of turbine operating modes optimization. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2026;26(2):109–114. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260209

Введение

На крупных металлургических предприятиях электрическая и тепловая энергия, как правило, производится на собственных электростанциях. Одним из способов снижения затрат на производство электроэнергии на электростанциях является повышение энергетической эффективности режимов работы турбоагрегатов (далее – ТА). Обоснованный выбор режимов оборудования, в частности ТА, осуществляется с использованием методов математического моделирования и оптимизации, реализованных в том числе в рамках автоматизированных систем управления энергетической эффективностью электростанций.

Рассмотрению способов оптимизации режимов работы энергетического оборудования электростанций посвящены многочисленные работы, например [1–12].

В работе [11] авторы описали способы постановки и решения многокритериальной задачи поиска оптимальных режимов работы ТЭС, позволяющего находить одновременно экономичные и надежные режимы работы генерирующего оборудования. При этом учет параметров надежности предлагается производить на этапе распределения нагрузки. Авторы также предложили обобщенный алгоритм решения таких задач, базирующийся на идеях градиентных методов.

Способы оценки эффективности работы энергетического оборудования и расчета технико-экономических показателей (ТЭП) электростанции приведены, например, в работах [13–17].

В работе [14] авторы отмечают, что наиболее рациональным способом расчета ТЭП является тот, в котором используются эксплуатационные экономические показатели, характеризующие применяемое на электростанции оборудование. Для каждого элемента энергосистемы составляется характеристика, отражающая его энергетическую эффективность. В рамках этих характеристик строится модель, на основе которой проводятся оптимизационные расчеты.

Целью данной работы является повышение энергетической эффективности электростанции путем оптимального распределения тепловой и электрической нагрузки между ТА с учетом текущих технологических и технических ограничений.

1. Метод оптимизации режимов работы ТА

Решение задачи оптимизации осуществляется по критерию минимума удельного расхода тепла с паром на выработку электроэнергии:

$$\min q_T = \sum_{i=1}^n Q_{\varepsilon,i} / \sum_{i=1}^n W_{\varepsilon,i} \cdot 1000,$$

где $Q_{\varepsilon,i}$ – расход тепла с паром на выработку электроэнергии ТА;

$W_{\varepsilon,i}$ – выработка электроэнергии ТА;

i – номер ТА;

n – число ТА в работе.

Расход тепла с паром на выработку электроэнергии ТА:

$$Q_{\varepsilon,i} = Q_{0,i} - Q_{\text{тф},i} - Q_{\text{п},i},$$

где $Q_{0,i}$ – общий расход тепла на ТА;

$Q_{\text{тф},i}$, $Q_{\text{п},i}$ – расход тепла, отпущенного в теплофикационный и производственный отбор ТА соответственно.

Вследствие отсутствия возможности установки приборов учета расхода пара в теплофикационные и производственные отборы ТА осуществляется оценка указанных расходов на основе теплового баланса.

Расход тепла на ТА:

$$Q_{0,i} = D_{\text{п},i} (i_{\text{п},i} - i_{\text{п.в},i}),$$

где $D_{\text{п},i}$ – расход пара на ТА;

$i_{\text{п},i}$, $i_{\text{п.в},i}$ – энтальпия пара и питательной воды соответственно.

Расход пара на ТА здесь является расчетным параметром, определяемым на основе математической модели вида

$$D_{\text{п},i} = f(W_{\varepsilon,i}, Q_{\text{тф},i}, Q_{\text{п},i}, \mathbf{x}_i), \quad (1)$$

где \mathbf{x}_i – вектор режимных параметров ТА (например, температура, давление пара).

В качестве математической модели (1) используются индивидуальные энергетические характеристики ТА, определяемые по фактическим данным эксплуатации с учетом нормативных данных (например, диаграммы режимов). Подобный подход позволяет значительно снизить трудоемкость построения характеристик по сравнению с проведением теплотехнических испытаний оборудования. Метод построения характеристик рассмотрен в работе [17].

При решении задачи оптимизации должны выполняться ограничения на выработку электроэнергии, отпуск тепла в теплофикационные и производственные отборы как отдельных ТА, так и в целом их блоком, а также на режимные параметры, потребление пара отдельными ТА. Задание допустимых границ для значений параметров необходимо с целью учета текущих технологических ограничений, технического состояния и остановок оборудования.

2. Пример оптимизации режимов работы ТА

В качестве исходных данных использованы статистические данные эксплуатации ТА, значения которых приведены в табл. 1.

В табл. 2 представлены значения параметров ТА, полученные в результате решения задачи оптимизации.

Исходные данные

Таблица 1

Table 1

Source data

Наименование параметра	ТА № 1	ТА № 2	ТА № 3	ТА № 4	Блок ТА
Потребление пара, т/ч	218,5	174,1	267,7	163,8	824,2
Расход тепла в теплофикационный отбор, Гкал/ч	45,0	30,0	50,0	30,0	155,0
Выработка электроэнергии, МВт	0,0	50,0	30,0	50,0	130,0
Расход тепла на выработку электроэнергии, Гкал/ч	139,9	61,4	141,3	54,8	397,5

Оптимальные значения параметров

Таблица 2

Table 2

Optimal values

Наименование параметра	ТА № 1	ТА № 2	ТА № 3	ТА № 4	Блок ТА
Потребление пара, т/ч	300,0	132,9	271,2	152,3	856,4
Расход тепла в теплофикационный отбор, Гкал/ч	60,0	20,0	45,0	30,0	155,0
Выработка электроэнергии, МВт	0,0	40,0	60,0	30,0	130,0
Расход тепла на выработку электроэнергии, Гкал/ч	192,0	45,1	113,5	67,5	418,1

Как видно из табл. 1, 2, для снижения удельного расхода тепла с паром на выработку электроэнергии необходимо перераспределить расход тепла в теплофикационный отбор между ТА так, чтобы расход тепла для ТА № 2 и № 4 был максимальным, что обусловлено их техническим состоянием. Кроме того, необходимо перераспределить выработку электроэнергии между ТА: снизить для ТА № 1 и увеличить для ТА № 2 и № 4.

В результате решения задачи оптимизации снижение удельного расхода тепла с паром на выработку электроэнергии блоком ТА снизилось с 2697 до 2564 ккал/кВт, что составляет около 5 %.

Заключение

Повышение эффективности режимов работ электростанций металлургических предприятий является актуальной задачей. Рассмотрен метод оптимизации режимов работ ТА по критерию минимума удельного расхода тепла с паром на выработку электроэнергии блоком ТА. В основе решения задачи оптимизации используются индивидуальные энергетические характеристики ТА, определяемые по фактическим данным эксплуатации. Рассмотрен пример оптимизации режимов работы ТА на основе изложенного метода. Анализ результатов оптимизации показывает, что потенциальное снижение удельного расхода тепла с паром на выработку электроэнергии блоком ТА составляет около 5 %. При этом заданные ограничения на значения параметров режимов работы ТА выполнены. Метод оптимизации реализован в рамках автоматизированной системы управления энергетической эффективностью электростанции, основным назначением которой является повышение технико-экономических показателей работы электростанции. В связи со сложностью объекта и высокой степенью ответственности при принятии управленческих решений функционирование системы осуществляется в режиме «советчика» на основе данных технологических и технико-экономических параметров, считываемых с существующих автоматизированных информационных систем электростанции. Перспективным направлением дальнейшей работы является разработка цифровых двойников ТА для мониторинга и актуализации их энергетических характеристик в режиме реального времени.

Список литературы

1. Андриященко А.И., Аминов Р.З. Оптимизация режимов работы и параметров тепловых электростанций. М.: Высшая школа, 1983. 255 с.
2. Аракелян Э.К. Методика выбора оптимальных параметров и режимов работы оборудования энергоблоков на частичных нагрузках // Теплоэнергетика. 2002. № 4. С. 57–60.
3. Цыпулев Д.Ю., Аракелян Э.К., Макарьян В. Методические положения оптимального управления режимами ТЭЦ со сложным составом оборудования // Теплоэнергетика. 2008. № 3. С. 67–73.
4. Оптимизация режимов работы энергоблоков ТЭЦ / П.А. Щинников, Г.В. Ноздренко, О.В. Боруш, С.В. Зыков // Известия РАН. Энергетика. 2014. № 3. С. 54–60.
5. Казаринов Л.С., Игнатова Т.А., Колесникова О.В. Оптимизация нагрузки параллельно работающих по данным эксплуатации при неполных исходных данных // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2008. № 17 (117). С. 24–28.
6. Жуков В.П., Барочкин Е.В., Уланов Д.А. Распределение нагрузки между турбоагрегатами теплоэлектроцентрали с использованием принципа оптимальности Беллмана // Вестник ИГЭУ. 2009. Вып. 3. С. 1–4.
7. Султанов М.М., Кузеванов В.С. Разработка и апробация метода оптимизации режимов работы энергетического оборудования ТЭЦ // Энергосбережение и водоподготовка. 2009. № 6 (62). С. 24–27.
8. Оптимизация режимов функционирования ТЭЦ как способ повышения энергетической эффективности / В.С. Карманов, Б.Н. Мошкин, Ю.А. Секретарев и др. // Энергетика Татарстана. 2013. № 3 (31). С. 61–67.
9. Kragelund M., Leth J., Wisniewski R. Optimal Usage of Coal, Gas and Oil in a Power Plant // IET Control Theory and Applications. 2010. Vol. 4, no. 2. P. 282–293. DOI: 10.1049/iet-cta.2008.0613
10. Khan I.U., Ahmad T., Maan N. Feedback Fuzzy State Space Modeling and Optimal Production Planning for Steam Turbine of a Combined Cycle Power Generation Plant // Research Journal of Applied Sciences. 2012. Vol. 7, no. 2. P. 100–107. DOI: 10.3923/rjasci.2012.100.107
11. Поиск оптимальных режимов работы ТЭС блочного типа по критериям экономичности и надежности / М.М. Султанов, И.А. Болдырев, А.А. Константинов, Д.С. Агарков // Новое в российской электроэнергетике. 2024. № 11. С. 38–45.
12. Богдан Е.В., Голомыздо А.М., Карницкий Н.Б. Моделирование эффективных режимов работы ТЭС в условиях избытка мощности в энергосистеме // Энергетик. 2025. № 3. С. 23–26. DOI: 10.71527/EP.EN.2025.03.006
13. Филимонова В., Бобрицкая И. Увеличение маржинальности работы ТЭС // Энергорынок. 2013. № 10 (115). С. 34–36.
14. Мерцалов А., Киселева О., Рогов В. Повышение эффективности ТЭС с помощью аналитики ICONICS // Современные технологии автоматизации. 2013. № 2. С. 54–62.
15. Kragelund M., Leth J., Wisniewski R., Jönsson U. Profit Maximization of a Power Plant // European Journal of Control. 2012. Vol. 18 (1). P. 38–54. DOI: 10.3166/ejc.18.38-54
16. Yinsong W., Shizhe L., Jingyu T., Zheng Z. Performance Assessment of Thermal Power Plant Load Control System Based on Covariance Index // Control Engineering Practice. 2016. Vol. 54. P. 58–69. DOI: 10.1016/j.conengprac.2016.04.015
17. Kolesnikova O.V., Kazarinov L.S., Nelubina A.D. Identification of the Efficient Manufacturing Characteristics // Energy Procedia. 2017. Vol. 134. P. 79–88. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.602

References

1. Andryushchenko A.I., Aminov R.Z. *Optimizatsiya rezhimov raboty i parametrov teplovykh elektrostantsiy* [Optimization of Operating Modes and Parameters of Thermal Power Plants]. Moscow: Vysshaya shkola, 1983. 255 p. (In Russ.)
2. Arakelian E.K. [Methodology for Selecting Optimal Parameters and Operation Modes of Power Unit Equipment under Partial Loads]. *Teploenergetika*. 2002;(4): 57–60. (In Russ.)
3. Tsyulev D.Yu., Arakelyan E.K., Makarch'Yan V.A. Methodical principles for optimally controlling the operating conditions of cogeneration stations with a complex composition of equipment. *Thermal Engineering*. 2008;55(3):255–262. DOI: 10.1007/s11509-008-3013-6
4. Schinnikov P.A., Nozdrenko G.V., Borush O.V., Zykov S.V. Optimization operating mode of CHPP units. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 2014;(3):54–60. (In Russ.)

5. Kazarinov L.S., Ignatova T.A., Kolesnikova O.V. Optimization of twin turbochargers load according to exploitation data by incomplete source data. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2008;17(117):24–28. (In Russ.)
6. Zhukov V.P., Barochkin E.V., Ulanov D.A. Load distribution over turbosets of a heat and power plant using the Bellman's principle of optimization. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. 2009;(3):1–4. (In Russ.)
7. Sultanov M.M., Kuzevanov V.S. [Development and Validation of an Optimization Method for Operating Modes of CHP Plant Energy Equipment]. *Energy saving and water treatment*. 2009;6(62):24–27. (In Russ.)
8. Karmanov V.S., Moshkin B.N., Sekretarev Yu.A., Tchekalina T.V., Yakovenko K.N. Optimization modes of functioning combined heat and power plant as way of increase power efficiency. *Energetika Tatarstana*. 2013;3(31):61–67. (In Russ.)
9. Kragelund M., Leth J., Wisniewski R. Optimal Usage of Coal, Gas and Oil in a Power Plant. *IET Control Theory and Applications*. 2010;4(2):282–293. DOI: 10.1049/iet-cta.2008.0613
10. Khan I.U., Ahmad T., Maan N. Feedback Fuzzy State Space Modeling and Optimal Production Planning for Steam Turbine of a Combined Cycle Power Generation Plant. *Research Journal of Applied Sciences*. 2012;7(2):100–107. DOI: 10.3923/rjasci.2012.100.107
11. Sultanov M.M., Boldyrev I.A., Konstantinov A.A., Agarkov D.S. [Search for Optimal Operating Modes of Block-Type TPPs by Criteria of Economic Viability and Reliability]. *Novoe v rossiyskoy elektroenergetike = New in Russian Electrical Power-Engineering*. 2024;(11):38–45. (In Russ.)
12. Bogdan E.V., Golomyzdo A.M., Karnitskiy N.B. Parametric analysis of maneuverable operating modes of GRES in conditions of excess capacity in the energy system. *Energetik*. 2025;(3):23–26. (In Russ.) DOI: 10.71527/EP.EN.2025.03.006
13. Filimonova V., Bobritskaya I. [Improving Marginality of TPP Operations]. *Energorynok*. 2013;10(115):34–36. (In Russ.)
14. Mertsalov A., Kiseleva O., Rogov V. [Enhancing TPP Efficiency through ICONICS Analytics]. *Modern Automation Technologies*. 2013;(2):54–62. (In Russ.)
15. Kragelund M., Leth J., Wisniewski R., Jönsson U. Profit Maximization of a Power Plant. *European Journal of Control*. 2012;18(1):38–54. DOI: 10.3166/ejc.18.38-54
16. Yinsong W., Shizhe L., Jingyu T., Zheng Z. Performance Assessment of Thermal Power Plant Load Control System Based on Covariance Index. *Control Engineering Practice*. 2016;54:58–69. DOI: 10.1016/j.conengprac.2016.04.015
17. Kolesnikova O.V., Kazarinov L.S., Nelubina A.D. Identification of the Efficient Manufacturing Characteristics. *Energy Procedia*. 2017;134:79–88. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.602

Информация об авторах

Колесникова Ольга Валерьевна, канд. техн. наук, доц. кафедры автоматике и управления, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kolesnikovaov@susu.ru.

Мойсук Анастасия Дмитриевна, преподаватель кафедры автоматике и управления, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; moisukad@susu.ru.

Information about the authors

Olga V. Kolesnikova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Automatics and Control, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kolesnikovaov@susu.ru.

Anastasiya D. Moysuk, Lecturer of the Department of Automatics and Control, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; moisukad@susu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.12.2025

The article was submitted 15.12.2025