

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ КОТЛА

Лукшто Н.П.

Научный руководитель: канд. техн. наук, доц. Гаврилова А.А.

СамГТУ, г. Самара

Аннотация

В статье рассматривается проблема низкой эффективности работы котла ТП-240 на теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), которая обусловлена малым количеством потребителей. Низкая нагрузка на котёл приводит к повышенному расходу топлива и электроэнергии, снижению КПД и росту себестоимости производства энергии. Для решения этой проблемы проведено исследование, в рамках которого проанализированы режимы работы котла и определены оптимальные условия его эксплуатации. В качестве инструмента анализа использован многокритериальный метод оценки эффективности работы оборудования – Data Envelopment Analysis (DEA), получивший наибольшее распространение для анализа производств и производственных процессов в промышленности, энергетике и т.д. Метод основан на математическом моделировании производственных процессов и позволяет с высокой долей формализовать и минимизировать присутствие субъективного фактора при получении интегральных оценок. Экспериментальные данные, отражающие работу котла при различных уровнях нагрузки, позволили с помощью метода DEA оценить обобщённую эффективность его работы в разных режимах, провести анализ и выбрать оптимальные режимы его работы. Выработать рекомендации по оптимизации работы котла с оптимальным коэффициентом полезного действия (КПД) и минимальной себестоимости электрической и тепловой энергии при минимально возможных выбросах в атмосферу.

Ключевые слова: сравнительная эффективность, Data Envelopment Analysis (DEA), оптимизация, расход топлива, выбросы, ресурсы.

MULTICRITERIAL SELECTION OF THE OPTIMAL BOILER OPERATION MODE

Natalia Luksho

Scientific supervisor: Cand. of Tech. Sciences, Associate Professor GavriloVA A.A.

Samara State Technical University, Samara

Abstract

This article examines the low efficiency of a TP-240 boiler at a combined heat and power plant (CHP), which is caused by a small number of consumers. Low boiler loads lead to increased fuel and electricity consumption, reduced efficiency, and higher energy production costs. To address this issue, a study was conducted analyzing the boiler's operating modes and determining its optimal operating conditions. Data Envelopment Analysis (DEA), a multi-criteria method for assessing equipment efficiency, is used as the analysis tool. Data Envelopment Analysis (DEA) is widely used to analyze production processes and manufacturing in industry, energy, and other sectors. Based on mathematical modeling of production processes, the method allows for a high degree of formalization and minimization of subjective factors when obtaining integrated assessments. Experimental data reflecting boiler operation at various load levels allowed DEA to be used to estimate its overall efficiency in various modes, analyze it, and select the optimal operating modes. Develop recommendations for optimizing boiler operation with optimal efficiency and minimal cost of electrical and thermal energy with minimal possible emissions into the atmosphere.

Keywords: comparative efficiency, Data Envelopment Analysis (DEA), optimization, fuel consumption, emissions, resources.



Введение

В современных условиях оптимизация работы энергетических объектов является важной задачей, которая позволяет повысить их эффективность, снизить себестоимость производства энергии и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

Объектом данного исследования является котёл ТП-240, установленный на ТЭЦ. ТЭЦ была построена для снабжения промышленным паром нефтеперерабатывающего завода. В настоящее время, в связи с прекращением паропотребления нефтеперерабатывающего завода и снижением постоянной в течение года нагрузки, значительная часть оборудования не используется и выведена в длительную консервацию, часть демонтирована.

В результате этих изменений оборудование ТЭЦ работает в нерасчётных режимах, в том числе и исследуемый котёл ТП-240, что приводит к ряду негативных последствий: повышенному расходу топлива и электроэнергии, снижению коэффициента полезного действия (КПД) и, соответственно, росту себестоимости производства энергии [1].

Цель данного исследования – повысить эффективность работы котла ТП-240 в условиях сниженной нагрузки. Для достижения этой цели необходимо проанализировать статистические данные его работы, полученные экспериментально, и определить оптимальный для конкретного котла режим. В качестве инструмента анализа будет использован метод Data Envelopment Analysis (DEA), который позволяет объективно оценить сравнительную эффективность работы объекта исследования в различных состояниях: котла в различных режимах. Глобальный критерий сравнительной эффективности формируется на основе свертки множества частных критериев. Весовые коэффициенты частных критериев определяются в ходе решения задачи математического программирования [2, 3].

Практическая значимость работы заключается в возможности снижения себестоимости производства энергии, повышения КПД котла, сокращения расхода ресурсов и вредных выбросов, а также увеличения объёма продаваемой электроэнергии без дополнительных финансовых вложений. Реализация рекомендаций, разработанных на основе исследования, может существенно улучшить экономические и экологические показатели работы ТЭЦ в целом.

Материалы и методы

Чтобы повысить эффективность работы котла ТП-240, необходимо определить оптимальные режимы его эксплуатации. Для этого будет использован современный и объективный метод анализа – Data Envelopment Analysis (DEA). Этот метод, основанный на математическом моделировании производственных процессов, позволяет оценить эффективность работы котла в различных режимах [2].

В качестве основы для анализа будут использованы данные, полученные в ходе экспериментов (табл. 1) при различных уровнях нагрузки. Таким образом, нагрузки котла являются порядковыми номерами состояний объекта.

Входными показателями x_{jn} , которые необходимо минимизировать, станут: расход газа, электроэнергии и объём выбросов. В качестве выходного параметра u_{in} , характеризующего эффективность, будет использован коэффициент полезного действия (КПД) котла [2].



Таблица 1

Экспериментальные данные работы котла ТП-240

| $D_{пр}$ (приведенная нагрузка котла, т/ч) | y_1 (КПД брутто, %) | x_1 (приведенный расход газа, G газа тыс·м ³ /ч) | x_2 (уд. расход электрической энергии на тягу и дутье, ЭДВ, кВт·ч/тп) | x_3 (приведенное содержание NO _x среднее, NO _x мг/м ³) |
|---|--------------------------|--|--|---|
| 114,78 | 88,68 | 9,40 | 7,80 | 192,50 |
| 116,65 | 90,38 | 9,55 | 5,10 | 160,58 |
| 118,68 | 90,91 | 9,43 | 4,42 | 212,18 |
| 129,35 | 91,10 | 10,30 | 4,53 | 224,74 |
| 145,85 | 89,90 | 11,40 | 6,41 | 163,90 |
| 149,93 | 91,17 | 11,99 | 4,87 | 251,80 |
| 161,64 | 91,56 | 13,35 | 5,17 | 216,75 |
| 169,34 | 91,48 | 13,56 | 5,21 | 244,23 |
| 176,89 | 90,65 | 14,20 | 5,79 | 153,70 |
| 182,31 | 92,23 | 14,47 | 4,47 | 263,93 |
| 191,03 | 91,56 | 15,01 | 5,07 | 305,46 |
| 196,64 | 92,21 | 15,27 | 5,02 | 211,96 |
| 209,19 | 91,19 | 16,80 | 5,52 | 130,00 |
| 211,17 | 91,79 | 16,51 | 5,05 | 298,09 |
| 224,84 | 91,28 | 18,30 | 5,65 | 143,50 |
| 229,76 | 92,12 | 17,88 | 4,99 | 229,72 |
| 235,49 | 92,76 | 18,47 | 4,51 | 160,82 |

Глобальный критерий сравнительной эффективности работы котла в различных режимах представим в виде:

$$f_n = \frac{u_{1n}y_{1n}}{v_{1n}x_{1n} + v_{2n}x_{2n} + v_{3n}x_{3n}}, \quad n = 1, 2, \dots, 17 \tag{1}$$

где u_{1n} – коэффициент полезного действия котла; x_{1n} – расход газа; x_{2n} – удельный расход электроэнергии на тягу и дутье; x_{3n} – содержание NO_x; $u_{1n}, v_{1n}, v_{2n}, v_{3n}$ – положительные весовые коэффициенты; n – количество состояний котла (режимов работы), $n = 1, 2, \dots, 17$ число оцениваемых состояний котла (режимов работы).

При расчете используется система ограничений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{u_{1 \times 1} \times \text{КПД}_1}{v_{1 \times 1} \times G_{\Gamma 1} + v_{2 \times 1} \times \text{ЭДВ}_1 + v_{3 \times 1} \times \text{NO}x_1} \leq 1; \\ \frac{u_{1 \times 2} \times \text{КПД}_2}{v_{1 \times 2} \times G_{\Gamma 2} + v_{2 \times 2} \times \text{ЭДВ}_2 + v_{3 \times 2} \times \text{NO}x_2} \leq 1; \\ \dots \dots \dots \\ \frac{u_{1 \times N} \times \text{КПД}_N}{v_{1 \times N} \times G_{\Gamma N} + v_{2 \times N} \times \text{ЭДВ}_N + v_{3 \times N} \times \text{NO}x_N} \leq 1. \end{array} \right. \tag{2}$$



Результаты решения системы уравнений приведены в табл/ 2.

Таблица 2

Результаты расчета котла ТП-240

| Приведенная нагрузка котла, $D_{пр}$, т/ч | u_1 | v_1 | v_2 | v_3 | f_n |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| 114,78 | 0,112 | 1,000 | 0,000 | 0,003 | 0,985 |
| 116,65 | 0,580 | 1,000 | 1,000 | 0,235 | 1,000 |
| 118,68 | 0,193 | 1,000 | 1,000 | 0,017 | 1,000 |
| 129,35 | 0,049 | 0,003 | 1,000 | 0,000 | 0,977 |
| 145,85 | 0,503 | 1,000 | 0,000 | 0,224 | 0,941 |
| 149,93 | 0,049 | 0,003 | 1,000 | 0,000 | 0,909 |
| 161,64 | 0,091 | 0,090 | 1,000 | 0,014 | 0,883 |
| 169,34 | 0,049 | 0,001 | 1,000 | 0,000 | 0,853 |
| 176,89 | 0,503 | 1,000 | 0,000 | 0,224 | 0,939 |
| 182,31 | 0,049 | 0,001 | 1,000 | 0,000 | 1,000 |
| 191,03 | 0,049 | 0,003 | 1,000 | 0,000 | 0,876 |
| 196,64 | 0,091 | 0,090 | 1,000 | 0,014 | 0,894 |
| 209,19 | 1,000 | 0,786 | 0,975 | 0,558 | 1,000 |
| 211,17 | 0,049 | 0,001 | 1,000 | 0,000 | 0,881 |
| 224,84 | 0,116 | 0,000 | 1,000 | 0,039 | 0,943 |
| 229,76 | 0,049 | 0,001 | 1,000 | 0,000 | 0,896 |
| 235,49 | 0,127 | 0,099 | 1,000 | 0,034 | 1,000 |

В результате получены следующие численные значения функционалов сравнительной эффективности 17 режимов f_n для котла ТП-240. Из рис. 1 следует, что максимальное значение обобщённой эффективности ($f_n = 1$) имеют 5 режимов – (116,65; 118,68; 182,31; 209,19; 235,49), что составило 30% от общего числа режимов, на которых проводились испытания.

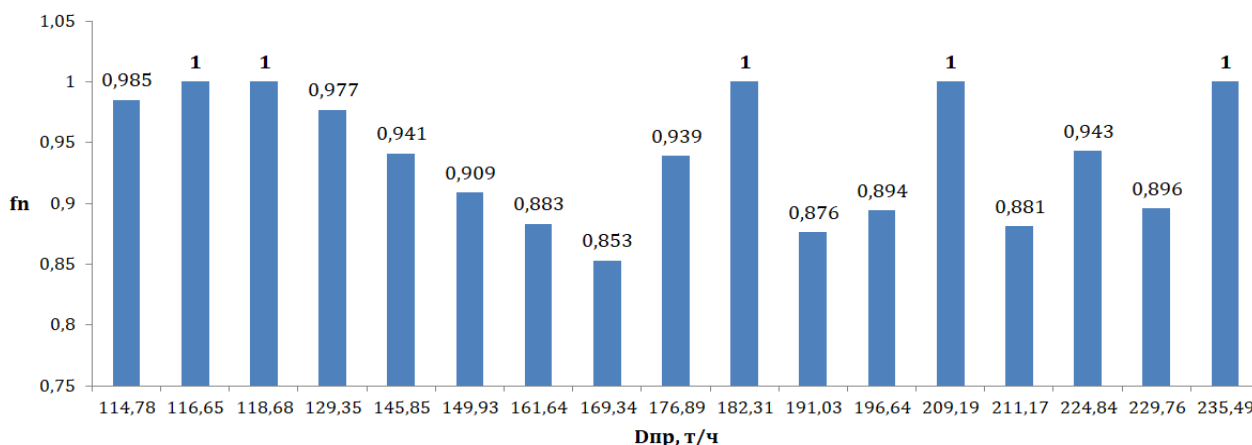


Рис. 1. Показатели сравнительной эффективности режимов работы котла ТП-240

Режимы (114,78; 129,35; 145,85; 149,93; 176,89; 224,84) имеют достаточно высокие значения показателя обобщённой эффективности в интервале ($f_n = 0,909-0,985$).

Наименьшей эффективностью обладают режимы (169,34; 191,03; 211,17), эти режимы характеризуются высокими значениями содержания оксидов азотов в продуктах сгорания NO_x и высоким значением расхода газа. Этими факторами обуславливается снижение показателя сравнительной эффективности работы котла до минимального значения.

Таким образом, применение DEA-методики количественно определяет обобщённые критерии эксплуатации котла, что позволит проводить сравнение и оптимизацию его режимов работы в существующих условиях [2-5].

Результаты и обсуждение

В результате проведённой работы были проанализированы режимы работы котла ТП-240 с целью повышения его эффективности. Для этого использовались экспериментальные данные, отражающие работу котла при различных уровнях нагрузки (табл. 1), и метод математического моделирования Data Envelopment Analysis (DEA). На основе проведённых расчётов (табл. 2) выявлено, что в некоторых диапазонах приведённой нагрузки котёл демонстрирует достаточно высокие показатели эффективности (параметр f_n близок к 1). Например, в диапазоне от 114,78 до 145,85 т/ч наблюдается наиболее сбалансированное сочетание характеристик работы котла.

Таким образом, работа позволила определить оптимальные режимы эксплуатации котла ТП-240, что может способствовать снижению себестоимости производства энергии и повышению эффективности работы ТЭЦ. Дальнейшая оптимизация режимов работы котла с учётом экономических и технических факторов может привести к сокращению собственных расходов электроэнергии и увеличению объёма продаваемой электроэнергии.

Выводы

Научная новизна работы заключается в применении метода DEA для анализа работы конкретного котла типа ТП-240 и в получении количественных оценок эффективности его работы в различных режимах. Это позволяет расширить базу знаний о возможностях оптимизации работы энергетического оборудования с помощью математических методов моделирования.

Практическая значимость работы состоит в том, что мы определили диапазон оптимальных для котла нагрузок и можем сделать вывод о том, что котел ТП-240 способен работать оптимально на минимальных нагрузках (до 150 т/ч), и таким образом оптимальная и наиболее эффективная работа самой ТЭЦ возможна при распределении нагрузки между котлами таким образом, чтобы на один котел приходилось не более 150 т/ч приведенной нагрузки. Данная модель работы может быть реализована в летний период времени, когда теплотребление минимально.

Реализация рекомендаций, разработанных на основе проведённого исследования, может привести к существенному улучшению экономических и экологических показателей работы ТЭЦ без необходимости дополнительных финансовых вложений.

Библиографический список

1. Дилигенский Н.В., Гаврилова А.А., Салов А.Г., Гаврилов В.К. Комплексный анализ режимов работы основного оборудования генерирующих предприятий и расходов электрической



- энергии на собственные нужды // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2008. – № 2(22). – С. 186-195. EDN [LALECL](#).
2. **Гаврилова А.А., Салов А.Г.** Системная методология анализа и моделирования энергоэффективности генерирующих компаний: монография. – Самара: ООО "Научно-технический центр", 2021. – 277 с. EDN [ZZZXNK](#).
 3. **Гаврилова А.А., Сагитова Л.А.** Многокритериальная оценка сравнительной эффективности котельного оборудования // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: Сб. ст. 81-ой Всерос. научно-техн. конф. – Самара: СГТУ, 2024. – С. 683-692. EDN [HXNGPC](#).
 4. **Максимов М.О.** Повышение эффективности комбинированного производства тепла и электроэнергии // Globus: Технические науки. – 2021. – Т. 7, № 2(38). – С. 58-66. – EDN [VNRCOZ](#). DOI: [10.52013/2713-3079-38-2-9](https://doi.org/10.52013/2713-3079-38-2-9)
 5. **Белобородов С.С., Дудолин А.А.** Маневренные когенерационные ТЭЦ в современной энергосистеме: монография. – СПб.: Научно-технологические технологии, 2023. – 212 с. EDN [ILUYGS](#).

References

1. Diligenskij, N. V., Gavrilova, A. A., Salov, A. G., & Gavrilov, V. K. (2008). Kompleksnyj analiz rezhimov raboty osnovnogo oborudovaniya generiruyushchikh predpriyatij i raskhodov ehlektricheskoy ehnergii na sobstvennyye nuzhdy [Comprehensive analysis of the operating modes of the main equipment of generating enterprises and the cost of electric energy for their own needs]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki, 2(22)*, 186-195. [In Russian]
2. Gavrilova, A. A., & Salov, A. G. (2021). *Sistemnaya metodologiya analiza i modelirovaniya ehnergoehffektivnosti generiruyushchikh kompanij: monografiya* [System methodology of analysis and modeling of energy efficiency of generating companies: monograph]. Nauchno-tekhnicheskij centr. [In Russian]
3. Gavrilova, A. A., & Sagitova, L. A. (2024). Multicriteria assessment of comparative effectiveness of boiler equipment. In *Proc. Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arkhitekture. Stroitel'stvo i stroitel'nye tekhnologii* (pp.683-692). SGTU. [In Russian]
4. Maksimov, M. O. (2021). Increasing the efficiency of combined production heat and electricity. *Globus: Technical sciences, 7(2)*, 58-66. <https://doi.org/10.52013/2713-3079-38-2-9> [In Russian]
5. Beloborodov, S. S., & Dudolin, A. A. (2023). *Manevrennyye kogeneracionnyye TEHC v sovremennoj ehnergosisteme: monografiya* [Maneuverable cogeneration thermal power plants in the modern energy system: monograph]. –Nauchno-tekhnologicheskie tekhnologii. [In Russian]

Сведения об авторах

Лукшто Наталья Петровна, магистратура, студент группы 2-СТФ-24ФИСПОС-103М, кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Самара, e-mail: lukshnton@yandex.ru

Authors about

Natalia Lukшто, student of Samara State Technical University.

Ссылки для цитирования

Лукшто Н.П. Многокритериальный выбор оптимального режима работы котла // Энергетические системы. – 2025. – № 3. – С. 89-94.

Lukшто, N. (2025). Multicriterial selection of the optimal boiler operation mode. *Energy Systems, 3*, 89-94. <https://doi.org/10.34031/es.2025.3.11>

