

## Optimal Solutions for Load Sharing between Units of a Combined Heat and Power Plant

Shchinnikov P. A., Borush O.V., Zykov S.V., Mikhaylenko A.I.

Novosibirsk State Technical University  
Novosibirsk, Russian Federation

**Abstract.** The article presents the optimization method of load division between combined heat and power plant units. The method used the power unit division into functioning parts and the differential-exergy method. This method allowed presenting the unit as a structural diagram where exergetic subsystems are fuel supply, steam generator, turbine, generator and electrical equipment, water supply and regeneration, heat supply to the consumer. The differential-exergy method was based on a combination of exergy analysis and optimization method of economic efficiency criteria using uncertain Lagrange multipliers. The use of the exergy function of goal allowed avoiding the problem of division of fuel costs for each type of product that was important at optimization. The optimization criterion, its parameters and limitations were developed as well. These parameters can extend traditional technical and economic analysis of the combined heat and power plants operating mode, as they take into account thermodynamically rigorous division of fuel costs between heat and electric power at their complex production on the combined heat and power plants. The use of the differential-exergy method in optimizing the load distribution of the power units of the combined heat and power plants makes possible obtaining of fuel savings of 1.5 to 3%. It has been shown that if the parameters of power units deteriorate, the application of the method makes it possible to have the best performance of the power plant when it is compared with functioning of combined heat and power units at proportional loading.

**Keywords:** optimization, exergy, criterion, power unit, distribution, load.

### Soluții optime de distribuția sarcinii între unitățile de putere a unei centrale electrice cu termoficare

Schinnikov PA, Borush OV, Zykov SV, Mikhaylenko AI

Universitatea Tehnică de Stat din Novosibirsk  
Novosibirsk, Federația Rusă

**Rezumat.** În lucrare se prezintă principalele prevederi ale metodei de optimizare a distribuției sarcinilor între agregatele unei centrale termice și centrale electrice combinate, pe baza divizării unității de putere în părți funcționale și a aplicării unei metode de diferențiere-exergie. Abordarea prezentată ne permite să determinăm fluxurile de exergie pentru orice secțiune a unității de putere în cauză, ce este importantă în determinarea exergiei cu eliberarea de căldură, și este aplicată mai întâi la soluționarea problemei optimizării regimului. Utilizarea funcției exergie permite evitarea soluționării problemei de alocare separată a cheltuielilor pentru combustibil pe fiecare tip de produs, ceea ce este important pentru optimizare. Se formulează criteriul de optimizare, parametrii și limitele acestuia. Se demonstrează că efectul distribuției optime a încărcăturii între unități poate fi de 1,5 ... 3%. Se demonstrează că, în cazul în care parametrii unităților de putere se abat de la valorile nominale, procedura de optimizare a sarcinilor face posibili indicatori mai buni decât funcționarea centralei electrice cu termoficare la parametrii nominali, dar cu încărcare proporțională a unităților de generare.

**Cuvinte-cheie:** optimizare, exergie, criteriu, unitate de putere, distribuție, sarcină.

### Оптимальные решения распределения нагрузки между агрегатами теплоэлектроцентрали

Щинников П.А., Боруш О.В., Зыков С.В., Михайленко А.И.

Новосибирский государственный технический университет  
Новосибирск, Российская Федерация

**Аннотация.** В статье представлены основные положения метода оптимизации распределения нагрузок между агрегатами теплоэлектроцентрали, в основе которого лежит разделение энергоблока на функционирующие части и применение дифференциально-эксергетического метода. Представленный подход позволяет определить потоки эксергии в любом сечении рассматриваемого энергоблока, что важно при определении эксергии с отпуском теплоты. Применение эксергетической функции цели позволяет избежать задачи разнесения затрат на топливо по каждому виду продукции, что важно при оптимизации, и впервые применяется для задачи оптимального распределения режимов агрегатов ТЭЦ. Сформулированы критерий оптимизации, его параметры и ограничения. Показано, что эффект от оптимального распределения нагрузки между агрегатами может составлять 1,5...3%. Показано, что при отклонении термодинамических параметров пара энергоблоков от номинальных значений процедура оптимизации распределения нагрузок позволяет получить лучшие технико-экономические показатели

теплоэлектроцентрали по сравнению с работой станции на номинальных параметрах, но при пропорциональном несении нагрузок агрегатами ТЭЦ.

**Ключевые слова:** оптимизация, эксергия, критерий, энергоблок, распределение, нагрузка.

## Введение

Общая электрическая мощность теплоцентралей России в настоящее время составляет порядка 90 ГВт, мощность тепловая около 260 тыс. Гкал/ч. Нередко одна ТЭЦ должна обеспечивать разнородную нагрузку, имея при этом разнотипное оборудование. С другой стороны, каждая станция стремится к снижению затрат на топливо, что может быть обеспечено наивыгоднейшим сочетанием работающего оборудования и заданных тепловых и электрических нагрузок. Таким образом, повышение эффективности работы ТЭЦ может быть решено оптимальным распределением нагрузок [1 - 8].

Оптимизация режимов работы основного энергооборудования ТЭЦ является одной из наиболее непростых задач [9 – 15]. Сложность в данном случае связана с неопределенностью исходных данных по расчетным параметрам и ограничениям. Кроме того, в расчетах необходимо учитывать, что ТЭЦ может иметь различный состав оборудования и варианты реализации тепловых схем, различные внешние условия и параметры работы установок [16-20].

## I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В предлагаемой статье для решения задачи оптимизации режимов работы ТЭЦ впервые предлагается использовать дифференциально-эксергетический метод [7], основанный на сочетании эксергетического анализа и метода оптимизации по критериям экономической эффективности с использованием неопределенных множителей Лагранжа. Данный метод дает возможность уйти от условности в разнесении топливных издержек. Оптимизация режимов работы станции проводится в разработанном программно-вычислительном комплексе, при этом каждый раз выполняется полный расчет схемы ТЭЦ и определяются данные по эффективной загрузке оборудования ТЭЦ

Предлагаемый дифференциально-эксергетический подход основан на работах

представителей научной школы Новосибирского государственного технического университета [5, 17].

## II. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМ ИССЛЕДОВАНИЯ

Энергоблок при моделировании разделяется на функционирующие подсистемы или части: топливообеспечения (0), парового котла с его энергетическими системами (1): топливоподготовки, топливоподдачи и очистки дымовых газов; часть высокого давления турбины с системой промежуточного перегрева пара (2) и части турбины среднего и низкого давления (3); электрического генератора и оборудования (4); регенерации и технического водоснабжения (5); отпуска теплоэксергии потребителю (6). Моделирование теплоэлектроцентралей не блочной компоновки осуществляется путем условного разрыва поперечных связей, при этом ТЭЦ представляется в виде эквивалентных (однотипных с идентичными характеристиками) энергоблоков. Подобное разбиение делает возможным учет энергетических потоков с различным качеством в каждой структурной связи станции. Затем тепловая схема энергоблока представляется в виде структурной эксергетической схемы подсистем, Рис. 1.

Эксергетическая эффективность подсистем определяется как:

$$\eta_i = E_i^y / E_i^x,$$

где  $E_i^x$ ,  $E_i^y$  – эксергетические потоки на входе и выходе из подсистемы,  $i$  – номер подсистемы.

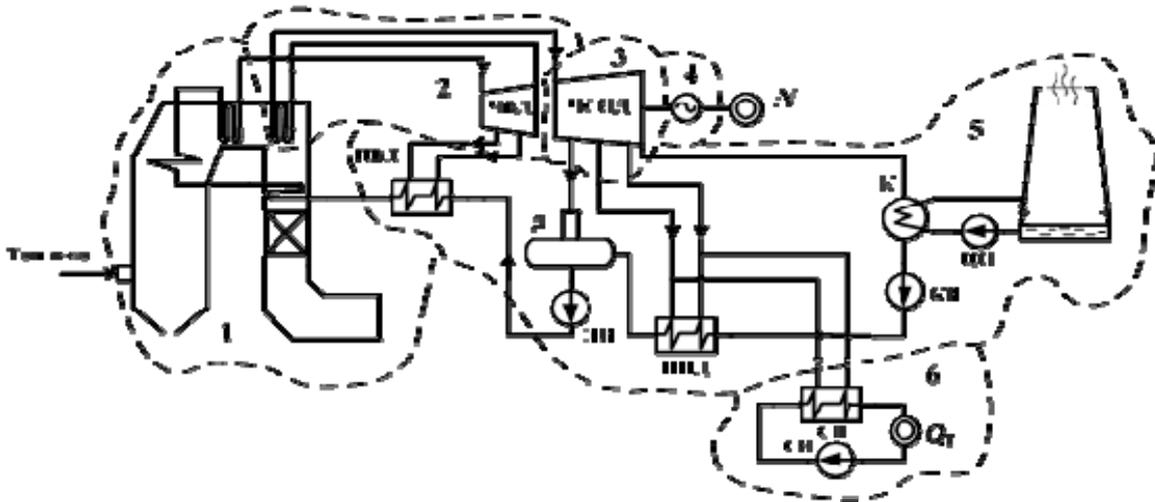
Эксергетические КПД по отпуску:

– электроэнергии:

$$\eta_N = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \varepsilon_S \varepsilon_N;$$

– теплоэксергии:

$$\eta_T = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_6 \varepsilon_S \varepsilon_N.$$



1 – 6 – подсистемы, ЧВД – часть высокого давления, ЧСНД – часть среднего и низкого давления, ТСН – трансформатор собственных нужд, ПВД, ПНД – группы подогревателей высокого и низкого давлений, Д – деаэрактор, СП – сетевой подогреватель, КН, ПН, СН, ЦН – насосы конденсатный, питательный, сетевой, циркуляционный соответственно.

Рис. 1. Разбиение тепловой схемы энергоблока ТЭЦ на подсистемы.

Здесь  $\epsilon_S$  – эксергетический структурный коэффициент, который учитывает технологические связи функционирующих систем и агрегатов энергоблока;  $\epsilon_N$  – эксергетический коэффициент внутрициклового возврата потерь тепловой энергии в турбоагрегате [7, 22]. Под теплоэксергией в данном случае понимают максимальную работоспособность потока, отпускаемого с теплотой.

Интегральный эксергетический КПД энергоблока определяют по совокупному отпуску электроэнергии ( $N$ ) и теплоты ( $E_T$ ):

$$\eta_e = (N + E_T) / E_0.$$

Здесь  $E_0$  – эксергия топлива.

При оптимальном распределении нагрузки между энергоблоками ТЭЦ эксергетический показатель эффективности (функция цели) примет вид:

$$\tilde{\eta}_z = \sum_n \eta_e (N + E_T) / \sum_n (N + E_T),$$

где  $n$  – число энергоблоков на ТЭЦ.

Представленный подход позволяет разделить потоки эксергии в любом сечении рассматриваемого энергоблока, что важно при определении эксергии с отпуском теплоты, так как этот поток чаще всего не замыкает технологическую цепочку преобразований энергии в энергоблоке. Применение эксерге-

тической функции позволяет избежать задачи разнесения затрат на топливо по каждому виду продукции, что важно при оптимизации [20, 21].

Процедура расчетов на примере ТЭЦ с “ $n$ ” энергоблоками представлена следующим образом, Рис. 2. В каждом расчетном режиме обеспечивается постоянство суммарной нагрузки станции по отпуску электрической энергии и теплоты:

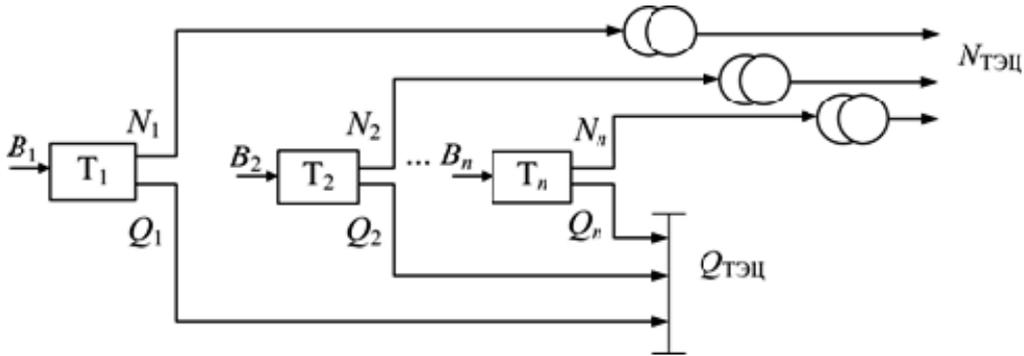
$$\begin{aligned} N_{\text{ТЭЦ}} &= \sum_{i=1}^n N_i = \text{const}; \\ Q_{\text{ТЭЦ}} &= \sum_{i=1}^n Q_i = \text{const}. \end{aligned} \quad (1)$$

В этих выражениях  $i = 1, 2, 3 \dots n$  – число теплофикационных энергоблоков на ТЭЦ.

В каждой итерации расчетов тепловая и электрическая нагрузки каждого энергоблока задаются случайным образом таким образом, чтобы выполнялось условие (1). Диапазон нагрузок при этом задается для  $i$ -го энергоблока в технически достижимых пределах:

$$\begin{aligned} N_i^{\min} &\leq N_i \leq N_i^{\max}; \\ Q_i^{\min} &\leq Q_i \leq Q_i^{\max}. \end{aligned}$$

В представленных неравенствах максимальные значения и минимальные зависят от фактического состояния энергоагрегатов [9].



$B_1, B_2 \dots B_n$  – расходы топлива на теплофикационные энергоблоки;  $T_1, T_2, \dots T_n$  – теплофикационные энергоблоки;  $N_1, N_2, \dots N_n$  – электрические нагрузки теплофикационных энергоблоков;  $Q_1, Q_2, \dots Q_n$  – тепловая нагрузка энергоблоков;  $N_{ТЭЦ}, Q_{ТЭЦ}$  – электрическая и тепловая нагрузки ТЭЦ.

**Рис. 2. Принципиальная схема энергоснабжения от теплоэлектроцентрали.**

Термодинамические параметры энергоблоков в общем случае отражают их фактические значения:

$$t_i^{\min} \leq \Delta t_i \leq t_i^{\max};$$

$$t_{охлi}^{\min} \leq t_{охлi} \leq t_{охлi}^{\max}.$$

$$P_0; t_0; P_{ПП}; t_{ПП}; t_{ПВ}; \alpha_{ТЭЦ}; t_{охл} \} = const,$$

где  $P_0$  – давление острого пара, МПа;  $t_0$  – температура острого пара, °С;  $P_{ПП}$  – давление пара промежуточного перегрева, МПа;  $t_{ПП}$  – температура пара промперегрева, °С;  $t_{ПВ}$  – температура питательной воды;  $\alpha_{ТЭЦ}$  – коэффициент теплофикации;  $t_{охл}$  – температура воды, охлаждающей на входе в конденсатор, °С;  $\Delta t$  – температурный напор в конденсаторе, °С.

В то же время, индивидуальная настройка модели на отдельный энергоблок, работающий в составе теплоэлектроцентрали, предусмотрена когда:

$$P_{0i}^{\min} \leq P_{0i} \leq P_{0i}^{\max};$$

$$t_{0i}^{\min} \leq t_{0i} \leq t_{0i}^{\max};$$

$$P_{ППi}^{\min} \leq P_{ППi} \leq P_{ППi}^{\max};$$

$$t_{ППi}^{\min} \leq t_{ППi} \leq t_{ППi}^{\max};$$

$$t_{ПВи}^{\min} \leq t_{ПВи} \leq t_{ПВи}^{\max};$$

$$\alpha_{ТЭЦi}^{\min} \leq \alpha_{ТЭЦi} \leq \alpha_{ТЭЦi}^{\max};$$

Диапазон изменения термодинамических параметров вызван неопределенностью в информационном обеспечении конкретного энергоблока [12]. В таком случае программный комплекс выполнит согласование балансовых уравнений с определением наиболее вероятного значения параметра при заданной мощности и минимальном расходе топлива [21, 22].

Таким образом, в методике учтены внешние и внутренние ограничения, при этом внешние – это ограничения по нагрузке станции и энергоблоков, а внутренние – ограничения термодинамического цикла и вид тепловой схемы.

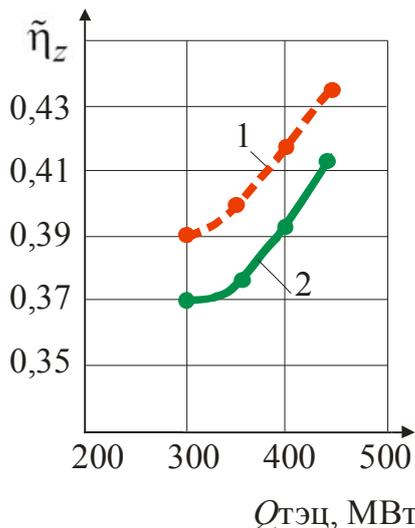
## II РЕЗУЛЬТАТЫ

Для расчетов применен метод случайного направленного поиска, исходными данными являются температуры и давления свежего пара и пара промежуточного перегрева, температуры питательной воды, наружного воздуха и охлаждающей воды, коэффициента теплофикации, тепловых и электрических нагрузок. Электрическая и тепловая мощности станции в качестве начальной точки отсчёта  $X_0$  распределяются пропорционально номинальным электрической и тепловой нагрузкам функционирующих энергоблоков. В окрестностях точки определяется несколько значений функции, на основании которых вычисляется новая точка  $X_1$ . Направления изменения компонентов  $X$  задаются

случайными числами, все направления равновероятны, а движение к экстремуму осуществляется только тогда, когда результат данного случайного движения приводит к уменьшению функции цели [7, 22].

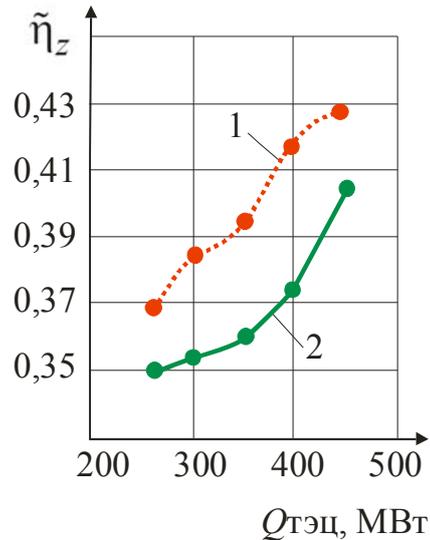
Кроме того, для энергоблока определяются температура наружного воздуха, для которой рассчитываются температурный и тепловой графики нагрузки при заданном коэффициенте теплофикации, температуре прямой и обратной сетевой воды, давлении пара в теплофикационном отборе. Для известных (на данном шаге расчета) термодинамических параметров рассчитывается тепловая схема энергоблока и функционально зависимые параметры.

В целом разработанная модель представляет собой совокупность математических описаний элементов (групп элементов) реально функционирующего энергоблока со связями. Описание каждого элемента энергоблока обеспечивают в соответствии с разбиением энергоблока на функциональные части, Рис.1. Все модели подсистем согласованы между собой по входным параметрам и реализованы в программно-вычислительном комплексе. Работа программного комплекса показывает, что при оптимизации режимов работы ТЭЦ мощностью 300 МВт, повышение эффективности составляет 1,5 – 3% по сравнению с пропорциональной загрузкой оборудования, Рис. 3 – 6.



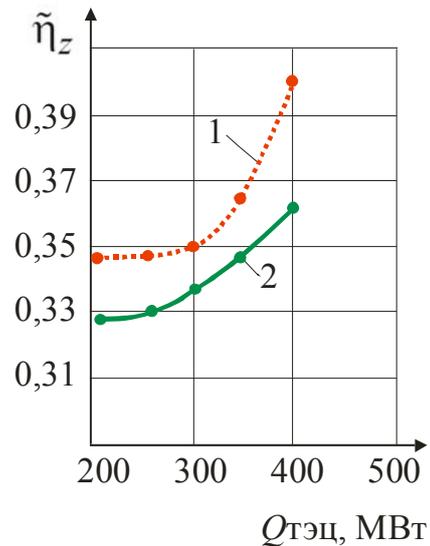
1 – оптимальное распределение нагрузок,  
2 – пропорциональное распределение нагрузок.

**Рис. 3. Эксергетический показатель эффективности ТЭЦ при электрической мощности 290 МВт.**



1 – оптимальное распределение нагрузок,  
2 – пропорциональное распределение нагрузок.

**Рис. 4. Эксергетический КПД ТЭЦ при электрической мощности 250 МВт.**



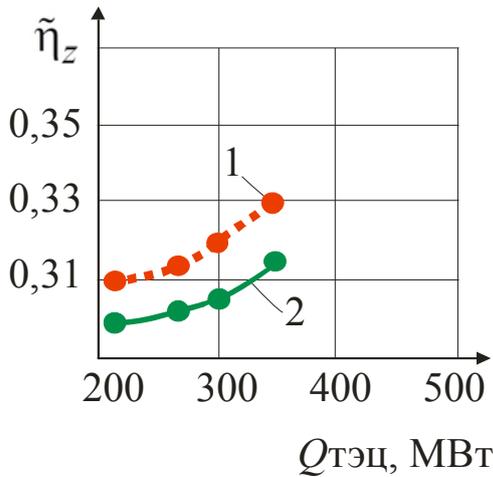
1 – оптимальное распределение нагрузок,  
2 – пропорциональное распределение нагрузок.

**Рис. 5. Эксергетический показатель эффективности ТЭЦ при электрической мощности 200 МВт.**

Меньшие значения соответствуют меньшим электрическим и тепловым нагрузкам. Экономия топлива составляет при этом 0,02 – 0,07 кг/с.

В то же время работа энергоблоков ТЭЦ характеризуется отклонением параметров от номинальных значений. Такие отклонения обусловлены старением оборудования, изменчивостью нагрузок, несортowymi поставками топлива, режимной наладкой

котельного агрегата, работой систем автоматики и другими факторами.



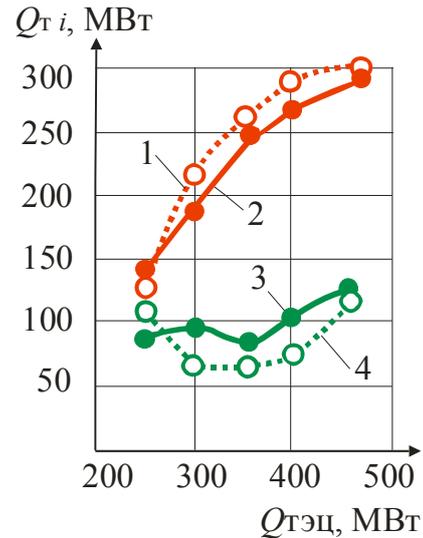
1 – оптимальное распределение нагрузок,  
2 – пропорциональное распределение нагрузок.

**Рис. 6. Эксергетический показатель эффективности ТЭЦ при электрической мощности 200 МВт.**

Диапазон изменения, например, для термодинамических параметров острого пара нормируется и отклонение от номинальных значений составляет 5 °С для температуры и 2 % для давления, однако на практике эти значения часто не удается выдержать. В этих условиях оптимальные решения по распределению нагрузок между агрегатами требуют проверки на определение их устойчивости. Другими словами, необходимо определить, насколько изменяются оптимальные решения по распределению нагрузки между агрегатами ТЭЦ при отклонении параметров их функционирования от номинальных (либо фактических) значений

Далее в статье рассмотрено влияние снижения начальных параметров пара на 2 % при одновременном снижении температуры питательной воды на 10 % на одном из двух блоков ТЭЦ, Рис. 7

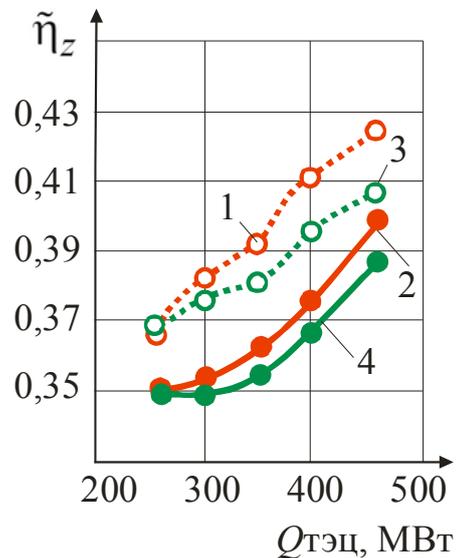
Можно видеть, что блок с ухудшенными параметрами после оптимизации получает меньшую загрузку (линия 2) по отношению к загрузке при номинальных значениях параметров (линия 1), в то же время для обеспечения суммарного отпуска теплоты догружается оставшийся энергоблок (линия 3, 4).



$Q_{Ti}$  – тепловая нагрузка энергоблока,  $Q_{TЭЦ}$  – тепловая нагрузка ТЭЦ, 1, 2 – блок с турбиной T-180, 3, 4 – блок с турбиной T-100, пунктиром показана загрузка на номинальных параметрах; сплошной линией показана загрузка при ухудшении параметров на блоке T-180.

**Рис. 7. Тепловая нагрузка энергоблоков и ТЭЦ в целом.**

Эффективность работы ТЭЦ в целом становится несколько ниже, чем при работе до снижения параметров, Рис. 8.



1 – с оптимальной загрузкой оборудования на номинальных параметрах; 2 – с пропорциональной загрузкой оборудования на номинальных параметрах; 3 – с оптимальной загрузкой оборудования при ухудшенных параметрах одного из энергоблоков; 4 – с пропорциональной загрузкой оборудования при ухудшенных параметрах одного из энергоблоков

**Рис. 8. Эксергетический показатель эффективности работы ТЭЦ.**

Оптимизация загрузки оборудования обеспечивает показатели эффективности ( $\eta_z$ ) на 2,7 – 4,9 % выше (меньшие значения для больших тепловых нагрузок), чем работа ТЭЦ на номинальных параметрах, но без оптимизации загрузки оборудования, Рис. 8.

### Выводы

1. Разработан дифференциально-эксергетический метод и впервые применен для решения задачи распределения нагрузки между энергоблоками ТЭЦ. Энергоблоки представляются в виде сложных систем элементов со связями, по которым движутся потоки эксергии. Данный подход позволяет решить задачу распределения ресурсов на отпускаемую продукцию разного вида. Дифференциальность метода позволяет определить характеристики энергоблоков в любом расчетном сечении (в частности, при отпуске электроэнергии с клемм генератора, а теплоэксергии – в любом отборе или за турбиной), а функцией цели выступает максимальная эффективность для совокупности работающих на ТЭЦ энергоблоков.

2. Показано, что при оптимизации нагрузок оборудования ТЭЦ повышение эффективности может составить 1,5 – 3 % по сравнению с пропорциональной нагрузкой энергоагрегатов. Причем меньшие значения соответствуют меньшим электрическим и тепловым нагрузкам ТЭЦ. При этом на энергоблоке экономия топлива может составить 0,02 – 0,07 кг/с. Наибольший эффект от оптимизации нагрузок энергоагрегатов ТЭЦ возможно обеспечить при нагрузках ТЭЦ в диапазоне 0,6 – 0,8 от максимальных значений.

3. Показано, что процедура оптимизации нагрузок позволяет обеспечить лучшие показатели работы ТЭЦ даже в условиях отклонения параметров от номинальных значений.

### Литература (References)

[1] Pechtl P., Dieleman M. Integrated Thermal Power and Desalination Plant Optimization. Paper No. 110 presented at the PowerGen Middle East Conference, Abu Dhabi, Oct., 2003. 20 p. doi: 10.1.1.127.2370

[2] Stojjkovic M. Mathematical modeling and optimization of tri-Generation systems with reciprocating engines. *Thermal science*, 2010,

vol. 14, no. 2, pp. 541-553. doi: 10.2298/TSCI1002541S.

- [3] Gornshcheyn V.M. Metodika raschyota naivygodneyshego raspredeleniya nagruzki mezhdu agregatami [Methods of calculating the most advantageous load distribution between units]. *Elektricheskiye stantsii – Electric stations*, 1962, no.8, pp. 2-7. (In Russian).
- [4] Andryushchenko A.I., Aminov R.Z. *Optimizatsiya rezhimov raboty i parametrov teplovykh elektricheskikh stantsiy* [Optimization of operating modes and parameters of thermal power plants]. Moscow, High school Publ., 1983. 255 p. (in Russian)
- [5] Aminov R.Z. *Vektornaya optimizatsiya rezhimov raboty elektrostantsiy* [Vector optimization of power plant operation modes]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1994. 304 p. (in Russian).
- [6] Arakelyan E.K., Minasyan S.A., Agababyan G.E. Metodicheskiye osnovy mnogokriterial'noy optimizatsii sutochnykh rezhimov raboty energooborudovaniya TETS [Methodical bases of multi-criteria optimization of daily operation modes of power CHP]. *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 2006, no.10, pp.7-10. (In Russian).
- [7] Nakoryakov V.E., Nozdrenko G.V., Shchinnikov P.A., Grigoryeva O.K. Basic provisions of exergy method and analysis of power plants with state-of-the-art heat pump combined cycle heating systems. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, vol. 19, no. 2, pp. 53-61. doi: 10.1134/S181023281
- [8] Kler A.M., Maksimov A.S., Stepanova E.L., Zharkov P.V., Tarariev R.A., Perevalov E.G. Optimizing the operating modes of cogeneration stations taking actual state of main equipment into account. *Thermal Engineering*, 2009, vol. 56, no 6, pp. 500-505.
- [9] Bolonov V.O., Arakelyan E.K. Optimizing the operating conditions of equipment at cogeneration stations built around combined-cycle plants. *Thermal Engineering*, 2007, vol. 54, no. 11, pp. 919-927. doi: 10.1134/S0040601507110134.
- [10] Murugan R. Artificial Bee Colony optimization for the Combined Heat and Power Economic Dispatch problem. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2012, no. 5, pp. 597-604.
- [11] Yusuf Sönmez. Estimation of fuel cost curve parameters for thermal power plants using the ABC algorithm. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2013, no. 21, pp. 1827-1841. doi: 10.3906/elk-1203-10.
- [12] Huang H., Peng D., Zhang Y., Liang Y. Research on Load Optimal Distribution Based on Equal Incremental Principle. *Journal of Computational Information Systems*, 2013, no. 9, pp. 7477-7484.

- [13] Elaiw A.M., Xia X., Shehata A.M. Combined Heat and Power Dynamic Economic Dispatch with Emission Limitations Using Hybrid DE-SQP Method. *Abstract and Applied Analysis*, 2013, vol. 2013, 10 p. doi: 10.1155/2013/120849.
- [14] Dincer I., Rosen M.A. Energy, environment and sustainable development. Elsevier, London, 2007. 454 p.
- [15] Vo Ngoc Dieu, Weerakorn Ongsakul. Combined Heat and Power Economic Dispatch by Augmented Lagrange Hopfield Network. *16th Power System Computation Conf.*, July 14-18, 2008, pp. 1-7.
- [16] Salari M., Vosough A. The effect of Ambient Temperature to Power Plant. *2nd International Conference on Mechanical, Production and Automobile Engineering (ICMPAE'2012)*, Singapore, April 28-29, 2012, pp. 248-252.
- [17] Chao-Lung Chiang, Shang-Zhi Lin Improved Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch of Combined Heat and Power. *International Conference on Power and Energy Systems Lecture Notes in Information Technology*, 2012, vol. 13, pp.133-139.
- [18] Yujiao Zeng, Yanguang Sun. An Improved Particle Swarm Optimization for the Combined Heat and Power Dynamic Economic Dispatch Problem. *Electric Power Components and Systems*, 2014, vol. 42, pp. 1700-1716. doi: 10.1080/15325008.2014.949913.
- [19] Ghalami H., Khamis Abadi S., Khoshgoftar Manesh M. H., Sadib T., Amidpour M., Hamed M. H. Steam Turbine Network Synthesis Using Total Site Analysis and Exergoeconomic Optimization. *Chemical Engineering Transactions*, 2012, vol. 29, pp. 1573-1578. doi: 10.3303/CET1229263.
- [20] Navratil P., Pekar L. Possible approach to creation and utilization of linear mathematical model of heat source for optimization of combined production of heat and electric energy. *International journal of mathematical models and methods in applied sciences*, 2012, issue 8, vol. 6, pp. 943-954.
- [21] Kaushika S.C., SivaReddya V., Tyagi S.K. Energy and exergy analyses of thermal power plants: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, no. 4, pp. 1857-1872. doi: 10.1016/j.rser.2010.12.007.
- [22] Shchinnikov P.A., Safronov A.V. Enhancing the calculation accuracy of performance characteristics of power-generating units by correcting general measurands based on matching energy balances. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, no. 12, pp. 898-904. doi: 10.1134/S0040601515060129.

#### Сведения об авторах:



**Щинников Павел Александрович**, Новосибирский государственный технический университет, кафедра тепловых электрических станций, доктор технических наук, профессор. Основное направление исследований: новые схемные решения для энергетических установок, обеспечивающие повышение термодинамической эффективности процессов; исследование технологий топливоиспользования в теплоэнергетических установках на основе математических моделей,

E-mail: [tes@nstu@gmail.com](mailto:tes@nstu@gmail.com)



**Борущ Олеся Владимировна**, Новосибирский государственный технический университет, кафедра тепловых электрических станций, кандидат технических наук, доцент. Основное направление исследований: комплексный анализ функционирования энергоблоков ТЭС на основе эксергетической методологии с учетом внутренних и внешних ограничений.

E-mail: [aborush@ngs.ru](mailto:aborush@ngs.ru)



**Зыков Сергей Владимирович**, Новосибирский государственный технический университет, кафедра тепловых электрических станций, аспирант. Основное направление исследований: оптимизация распределения тепловой и электрической нагрузки ТЭЦ.

E-mail: [zykovc@gmail.com](mailto:zykovc@gmail.com)



**Михайленко Анна Игоревна**, Новосибирский государственный технический университет, кафедра тепловых электрических станций, кандидат технических наук, доцент. Основное направление исследований: автоматическое регулирование технологических процессов на ТЭС, динамические характеристики объектов регулирования, технологические защиты теплоэнергетического оборудования ТЭС.

E-mail: [mikhaylenko@corp.nstu.ru](mailto:mikhaylenko@corp.nstu.ru)