

- lationship of statistical and informational entropy in describing the states of complex systems]. *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya : Matematika. Fizika* [Scientific Bulletin of the Belgorod State University. Series: Mathematics. Physics]. 2016, vol. 44, no. 20 (241), pp. 105–116.
5. Averin G. V., Zvyagintseva A. V. Vzaimosvyaz' termodinamicheskoy i informatsionnoy entropii pri opisaniy sostoyaniy ideal'nogo gaza [Interrelation of thermodynamic and information entropy in the description of ideal gas states]. *Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii v naukach o prirode i obshchestve* [System analysis and information technologies in the sciences of nature and society]. 2013, no. 1–2, pp. 26–37.
  6. Shakhov A. V. Entropiyunaya model' portfel'nogo upravleniya proyektno-orientirovannoy organizatsiyey [Entropy model of portfolio management of a project-oriented organization]. *Upravlinnya proyektamy ta rozvytok vyrobnyctva* [Project management and production development]. 2014, no. 2, pp. 87–95.
  7. Bushuyev S., Sochnev S. Entropy measurement as a project control tool. *International Journal of Project Management*. 1999, no. 17 (6), p. 343–350.
  8. Onishhenko S. P., Arabadzhi Ye. S. Struktura, tsel', produkt i tsennost' programm razvitiya predpriyatiy [The structure, purpose, product and value of enterprise development programs]. *Visnyk Odes'kogo natsional'nogo morskogo univertsytetu* [Bulletin of the Odessa National Marine University]. 2011, no. 33, pp. 75–86.
  9. Bondar A. V., Onishhenko S. P. Optimizatsiya vremennykh parametrov proyekta [Optimization of time parameters of project]. *Upravlinnya rozvytkom skladnykh system* [Management of Development of Complex Systems]. 2019, no. 39, pp. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.6084/M9.FIG-SHARE.11340629.V1>.
  10. Bondar A. V. Kontseptsiya tsinnosti lyuds'kykh resursiv proyektno-orientovanoi organizatsiyi [Human resources value concept for project-oriented organization]. *Zbirnyk naukovykh prats' Natsional'nogo univertsytetu korablebuduvannya imeni admirala Makarova* [Proceedings of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding]. Vydavnychyy dim «Gel'vatika». 2019, no. 1, pp. 135–141. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2019.1\(475\).19](https://doi.org/10.15589/znp2019.1(475).19).

Поступила (received) 18.01.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

**Бондар Алла Віталіївна (Бондарь Алла Витальевна, Bondar Alla Vitaliyivna)** – кандидат технічних наук, Одеський національний морський університет, м. Одеса; тел.: (063) 936-14-20; e-mail: ocheretyankaalla@gmail.com.

УДК 621.311

doi: 10.20998/2222-0631.2020.1.02

**В. А. ВАНИН, Б. В. ВАНИН, Н. М. КРУГОЛ**

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ГАЗОВОЗДУШНОГО ТРАКТА КОТЛА ТЭС

В работе предлагаются математические модели газозвдушного тракта котла и механизмов собственных нужд ТЭС. С использованием табличных и графических представлений напорных характеристик серийных вентиляторов и дымососов получены эквивалентные соотношения для сети механизмов. Исследована задача нахождения оптимальных параметров управления для группы центробежных механизмов, обеспечивающих работу газозвдушного тракта котла. Исследовано влияние разрежения в топке котла на режим работы его вспомогательных механизмов. Приводятся результаты моделирования для типичных последовательно-параллельных соединений механизмов в гидравлических сетях ТЭС.

**Ключевые слова:** тепловая электрическая станция, групповое управление, гидравлические системы, центробежные механизмы, частотно-регулируемы привод, энергоэффективность.

**В. А. ВАНИН, Б. В. ВАНИН, М. М. КРУГОЛ**

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РЕГУЛЮВАННЯ ГАЗОПОВІТРЯНОГО ТРАКТУ КОТЛА ТЕС

В роботі пропонуються математичні моделі газоповітряного тракту котла та механізмів власних потреб ТЕС. З використанням табличних та графічних представлень напірних характеристик серійних вентиляторів та димососів отримані еквівалентні співвідношення для мережі механізмів. Досліджена задача знаходження оптимальних параметрів керування для групи відцентрових механізмів, що забезпечують роботу газоповітряного тракту котла. Виконаний аналіз впливу розрідження в топці котла на режим роботи його допоміжних механізмів. Приводяться результати моделювання для типових послідовно-паралельних з'єднань механізмів в гідравлічних мережах ТЕС.

**Ключові слова:** теплова електрична станція, групове керування, гідравлічні системи, відцентрові механізми, частотно-регульований привід, енергоефективність.

**V. A. VANIN, B. V. VANIN, M. M. KRUGOL**

### MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL POWER PLANT'S BOILER AIR-GAS FLOW PATH REGULATION MODES

The paper presents a mathematical model for thermal power plant's boiler air-gas flow paths and auxiliaries. With application of production fans' and flue gas extractor fans' head-capacity curves and tables, equivalent relations for the net of the mechanisms are obtained. A problem of determining the optimal control parameters for a group of centrifugal mechanisms in the air-gas path is studied. The effect of the boiler furnace draft on its auxiliaries operation is analyzed. The results of mathematical modeling for typical serial and parallel connections of the mechanisms in the thermal power plant hydraulic network are given.

**Key words:** thermal power plant, group control, hydraulic systems, centrifugal mechanisms, variable frequency drive, energy efficiency.

© В. А. Ванин, Б. В. Ванин, Н. М. Кругол, 2020

**Введение.** Основными вспомогательными механизмами для работы парового котла являются *дутьевые вентиляторы и дымососы*, объединенные в систему обеспечения собственных потребностей. Экономичная работа этих механизмов влияет на показатели эффективности работы энергоблока и электростанции в целом. Для управления работой такой системы механизмов используют различные способы регулирования их производительности:

- регулирование производительности с помощью угла закрытия направляющего аппарата;
- регулирование скорости вращения рабочего колеса механизма, например, с помощью изменения частоты питающего напряжения – индивидуальный частотный привод;
- групповое регулирование производительности, регулирование частоты питающего напряжения группы центробежных механизмов с дальнейшим дорегулированием угла открытия направляющего аппарата [1, 2].

**Целью** работы является построение *математической модели газовоздушного тракта котла* и исследования характеристик оптимального режима работы дутьевых вентиляторов и дымососов.

**Анализ последних исследований.** Анализ некоторых способов регулирования производительности *центробежных механизмов* можно найти в работе Л. В. Проданова [3], где рассматривается возможность внедрения группового регулирования производительности на тепловых электрических станциях. В работах Ванг Шупинг и Е. Джуантао [4], Г. Б. Лазарева [5] производится анализ использования частотного привода в системах собственных нужд *тепловых электростанций (ТЭС)*.

Описание работы дутьевых вентиляторов и дымососов должно строиться на основе качественной математической модели их напорных характеристик  $H = H_i(Q, \alpha, f)$  и функций  $\eta = \eta_i(Q, \alpha, f)$  для вычисления индивидуального *коэффициента полезного действия (КПД)*. Используя их, строятся модели системы обеспечения работы парового котла ТЭС путем параллельно-последовательных соединений [6]. Некоторые математические модели энергетических котлов можно найти в работах А. А. Пономарева [7] и В. Е. Селезнева [8]. Математическому моделированию центробежных механизмов посвящена работа В. С. Костышина [9]. Общие показатели энергоэффективности таких систем задаются в виде некоторых функций от индивидуальных КПД механизмов.

Определения показателей работы (расходы, напоры и т.д.) систем обеспечения осуществляется решением уравнений, определяющих условия сопряжения с трубопроводной сетью и котлом.

**Постановка задачи и математическая модель газовоздушного тракта котла.** В *газовоздушный тракт* котла входят оборудование и трубопроводы, по которым движутся воздух, газ и продукты сгорания топлива. Их движение обеспечивается созданием в трубопроводном тракте перепада давлений с помощью тягодутьевых машин – дымососов и дутьевых вентиляторов.

На рис. 1 показано характерное распределение давления в газовоздушном тракте котла при его работе с уравновешенной тягой [10].

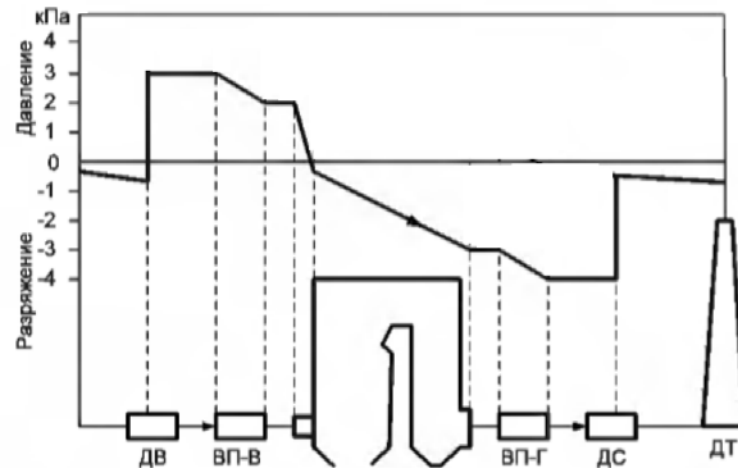


Рис. 1 – Распределение давлений в газовоздушном тракте при уравновешенной тяге: ДВ – дутьевой вентилятор; ВП-В – воздухоподогреватель (воздушная сторона); ВП-Г – воздухоподогреватель (газовая сторона); ДС – дымосос; ДТ – дымовая труба.

Каждый механизм сети задается напорной характеристикой вида  $H = H(Q, \alpha, f)$ , а сетевые элементы  $H = H_c(Q, \xi)$ , где  $Q$  – расход рабочей среды,  $\alpha$  – угол установки лопаток *направляющего аппарата (н.а.)*,  $f$  – частота питающего напряжения электропривода механизма,  $\xi$  – коэффициент сопротивления гидравлической сети. Чаще всего для них используют зависимость  $H_c(Q, \xi) = \xi Q^2$ . Для паровых энергетических котлов, используемых на украинских ТЭС, характерным является использование двух дутьевых вентиляторов и одного или двух дымососов.

Построим для эквивалентной схемы газовоздушного тракта котла, показанного на рис. 2, математическую модель. Так, состояние эквивалентной сети определяется набором характерных величин  $Q_K, Q_G, Q_B, Q_{VT}, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, f_1, f_2, f_3, f_4, \xi_{BT}, \xi_{GT}$ . Эти величины находим из решения системы уравнений для согласованных напорных характеристик групп механизмов при работе их на общие гидравлические сети. Структура уравнений определяется способом соединения механизмов и условиями работы на общие сети. Решения такой системы уравнений представляет параметризованное множество реализаций состояний сети. На нем решается оптимизационная задача энергоэффективности с целевой функцией – обобщенный показатель КПД.

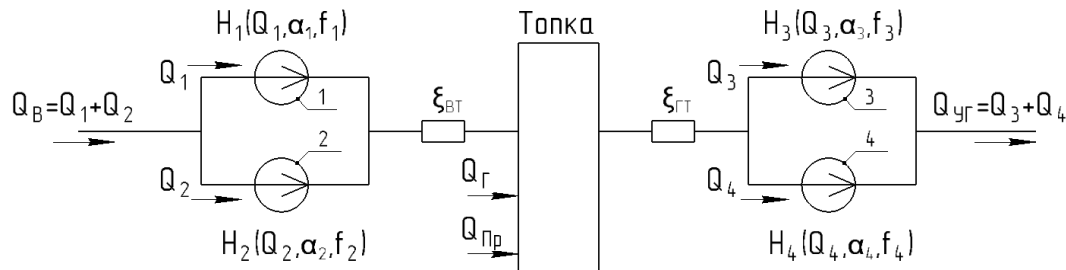


Рис. 2 – Эквивалентная схема газовоздушного тракта котла: 1, 2 – дутьевые вентиляторы; 3, 4 – дымососы;  $Q_B$  – необходимый расход воздуха для эффективного сгорания объема газа  $Q_G$ ;  $Q_{VT}$  – расход уходящих газов, которые образуются в результате процесса горения и присоса объема воздуха через неплотности в корпусе котла  $Q_{Pr}$ ;  $\xi_{BT}, \xi_{GT}$  – эквивалентные гидравлические сопротивления воздушной и газовой части тракта.

По зависимости расхода газа на производство пара в котле  $Q_G = Q_G(Q_K)$  выберем рабочую точку  $(Q_G, Q_K)$ . Тогда производительность дутьевого вентилятора можно определить из соотношения [10]:

$$Q_B = Q_G V_B^0 (\alpha_T - \Delta\alpha_T + \Delta\alpha_{BP}) \frac{t_{xв} + 273}{273},$$

где  $V_B^0$  – теоретически необходимое для горения количество воздуха,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $\alpha_T$  – коэффициент избытка воздуха в топке;  $\Delta\alpha_T$  – присосы воздуха в топке котла;  $\Delta\alpha_{BP}$  – относительная утечка воздуха в воздухоподогревателе котла;  $t_{xв}$  – температура холодного воздуха перед дутьевым вентилятором,  $^{\circ}\text{C}$ .

Принимаем, что два параллельно работающих дутьевых вентилятора работают в одинаковых условиях, и распределение производительностей между ними обеспечивается выбором параметров управления  $\alpha_1, \alpha_2, f_1, f_2$ .

При этом

$$Q_B = Q_1 + Q_2.$$

Производительность дымососа можно определить из соотношения [10]:

$$Q_{VT} = Q_G (V_{VT} + \Delta\alpha V_B^0) \frac{\vartheta_D + 273}{273},$$

где  $V_{VT}$  – объем продуктов сгорания 1  $\text{м}^3$  топлива,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $\Delta\alpha$  – присосы воздуха в газоходе и топке котла;  $\vartheta_D$  – температура уходящих газов перед дымососом,  $^{\circ}\text{C}$ .

При параллельной их работе имеем:

$$Q_{VT} = Q_3 + Q_4.$$

Центробежный механизм, работающий на сеть, представляет сложную техническую систему. При моделировании режимов работы центробежных механизмов воспользуемся известными для них напорными характеристиками [11, 12].

Вид эквивалентной напорной характеристики  $H = H_{\Sigma}(Q, \vec{\alpha}, \vec{f})$  при параллельной работе центробежных механизмов на общую сеть приведен в [6].

Работа эквивалентного центробежного механизма на сеть описывается следующим уравнением [12]:

$$H_{\Sigma}(Q, \vec{\alpha}, \vec{f}) = H_C(Q, \xi).$$

**Задача нахождения оптимальных параметров управления группой центробежных механизмов парового энергетического котла.** Пускай для обеспечения надежной и экономичной работы газо-воздушного тракта

котла используется группа из 4 центробежных механизмов с заданными характеристиками:

$$H = H_i(Q_i, \alpha_i, f_i), \quad i = 1 \dots 4; \quad \eta = \eta_i(Q_i, \alpha_i, f_i), \quad i = 1 \dots 4.$$

Параллельно работающие центробежные механизмы образуют механизмы с эквивалентными характеристиками:

$$H = H_{12}(Q, \vec{\alpha}, \vec{f}), \quad \vec{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2), \quad \vec{f} = (f_1, f_2);$$

$$H = H_{34}(Q, \vec{\alpha}, \vec{f}), \quad \vec{\alpha} = (\alpha_3, \alpha_4), \quad \vec{f} = (f_3, f_4).$$

Заданное разрежение в топке котла  $H_T$  должно обеспечиваться центробежными механизмами, эквивалентными гидравлическими сопротивлениями воздушного и газового участка газо-воздушного тракта котла  $\xi_{BT}, \xi_{GT}$ .

Напорные характеристики для воздушной и газовой части трактов запишем в виде:

$$H_{cBT}(Q_B) = \xi_{BT} Q_B^2; \quad H_{cGT}(Q_{VT}) = \xi_{GT} Q_{VT}^2.$$

Тогда, функционирование газозвушного тракта котла описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} Q_G = 88,535 Q_K - 118,77; \\ Q_B = Q_G V_B^0 (\alpha_T - \Delta\alpha_T + \Delta\alpha_{BP}) \frac{t_{x6} + 273}{273}; \\ Q_B = Q_1 + Q_2; \\ H_{12}(Q_B, \vec{\alpha}, \vec{f}) = H_{cBT}(Q_B) - H_T; \\ Q_{VT} = Q_G (V_{VT} + \Delta\alpha V_B^0) \frac{\vartheta_D + 273}{273}; \\ H_{34}(Q_{VT}, \vec{\alpha}, \vec{f}) = H_{cGT}(Q_{VT}) + H_T; \\ Q_{VT} = Q_3 + Q_4. \end{cases} \quad (1)$$

Параметры управления центробежными механизмами группы найдем из условия, что *средневзвешенный КПД* будет иметь наибольшее значение:

$$(\vec{\alpha}, \vec{f}) = \arg \max_{\substack{\alpha \in A, f \in F \\ \omega_{12}(\vec{\alpha}, \vec{f})=0 \\ \omega_{34}(\vec{\alpha}, \vec{f})=0}} \Psi(\vec{Q}, \vec{\alpha}, \vec{f}), \quad (2)$$

где  $A = \begin{pmatrix} \alpha_1 \in A_1 \\ \alpha_2 \in A_2 \\ \alpha_3 \in A_3 \\ \alpha_4 \in A_4 \end{pmatrix}$  – ограничения по углу открытия направляющего аппарата;  $F = \begin{pmatrix} f_1 \in F_1 \\ f_2 \in F_2 \\ f_3 \in F_3 \\ f_4 \in F_4 \end{pmatrix}$  – ограничения по

частоте питающего напряжения;

$$\omega_{12}(\vec{\alpha}, \vec{f}) = H_{12}(Q_B, \vec{\alpha}, \vec{f}) - H_{cBT}(Q_B) - H_T;$$

$$\omega_{34}(\vec{\alpha}, \vec{f}) = H_{34}(Q_{VT}, \vec{\alpha}, \vec{f}) - H_{cGT}(Q_{VT}) - H_T;$$

$$\Psi(\vec{Q}, \vec{\alpha}, \vec{f}) = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \eta_i(Q, \alpha, f)}{\sum_{i=1}^N P_i},$$

где  $P = P_i(Q)$  – мощность  $i$ -го механизма.

Поставленная задача решается *методом целенаправленного поиска*. Изменяя параметры  $\alpha_i, f_i, i = 1 \dots 4$  с учетом ограничений задачи оптимизации (2), найдем те их значения, для которых средневзвешенный КПД группы механизмов будет максимальным. Для разных способов регулирования производительности центробежных механизмов нужно будет учесть следующие особенности:

– при регулировании производительности центробежных механизмов изменением угла открытия направляющего аппарата фиксируется частота питающего напряжения на уровне напряжения сети – 50 Гц:

$$f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = 50 \text{ Гц} = \text{const};$$

– при групповом регулировании производительности частота питающего напряжения варьируется, но она остается равной для всех механизмов группы

$$f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = \text{var} .$$

**Пример расчета.** Рассмотрим нахождение оптимальных параметров управления группы центробежных механизмов, обеспечивающих работу парового энергетического котла MANN-120, установленного на Харьковской ТЭЦ-3. Диапазон работы котла по паропроизводительности – 60-120 т пара/ час. Давление пара после пароперегревателя – 70 кгс/см<sup>2</sup>, температура насыщенного пара – 490 °С .

Работу котла обеспечивают пара дутьевых вентиляторов типа ВДН-17-3 и пара дымососов ДН-18.

Характеристики дутьевого вентилятора ВДН-17-3 имеют вид:

$$H_{1,2}(Q, \alpha, f) = 0,10809f^2 + 0,00134\alpha f^2 + 0,0491 \cdot 10^{-3} Qf - 0,0013 \cdot 10^{-3} \alpha Qf - 0,00002\alpha^2 f^2 - 0,0432 \cdot 10^{-6} Q^2 ;$$

$$\eta_{1,2}(Q, \alpha, f) = 11,08442 + 1,28361\alpha + 136,2035 \cdot 10^{-3} Qf^{-1} - 1,18969 \cdot 10^{-3} \alpha Qf^{-1} - 0,01116\alpha^2 - 60,485 \cdot 10^{-6} Q^2 f^{-2} .$$

Характеристики дымососа ДН-18 имеют вид:

$$H_{3,4}(Q, \alpha, f) = 0,067655f^2 + 0,003413\alpha f^2 + 0,037102 \cdot 10^{-3} Qf - 0,0014 \cdot 10^{-3} \alpha Qf - 0,000034\alpha^2 f^2 - 0,003526 \cdot 10^{-6} Q^2 ;$$

$$\eta_{3,4}(Q, \alpha, f) = 13,027464 + 1,647837\alpha + 47,895852 \cdot 10^{-3} Qf^{-1} - 0,535853 \cdot 10^{-3} \alpha Qf^{-1} - 0,017458\alpha^2 - 10,064 \cdot 10^{-6} Q^2 f^{-2} .$$

Коэффициенты, используемые для моделирования режима работы котла, представлены в табл. 1.

Зависимость расхода газа от паропроизводительности котла MANN-120 имеет вид:

$$Q_{\Gamma} = 88,535Q_K - 118,77 .$$

По результатам математического моделирования режимов работы газозоудного тракта и решения задачи оптимального управления группой центробежных механизмов котла были получены зависимости средневзвешенного КПД группы механизмов от паропроизводительности котла при разных способах регулирования. На рис. 3 показаны результаты расчета для диапазона работы котла 90-120 т/час, при разрежении в топке котла на уровне 30 мм в.ст.

Таблица 1 – Значение коэффициентов

Обозначение	Значение	Примечание
Коэффициент избытка воздуха в топке котла	$\alpha_T = 1,1$	Топливо – природный газ [13]
Присос воздуха в топке котла	$\Delta\alpha_T = 0,05$	Для газо-мазутных котлов [13]
Присос воздуха в воздухоподогревателе котла	$\Delta\alpha_{ВП} = 0,03$	На каждую ступень Воздухоподогревателя [13]
Присосы воздуха в газоходе и топке котла	$\Delta\alpha = 0,2$	Для газо-мазутных котлов [13]
Теоретически необходимое для горения газа количество воздуха	$V_B^0 = 9,98 \text{ м}^3/\text{м}^3$	Для природного газа Шебелинского месторождения [14]
Теоретический объем продуктов сгорания газа	$V_{YT} = 11,19 \text{ м}^3/\text{м}^3$	Для природного газа Шебелинского месторождения [14]

Рассмотрим режим работы парового энергетического котла ТЭЦ при его паропроизводительности в 100 т/час. Согласно технической документации его работу обеспечивают два дымососа и два дутьевых вентилятора. Для реализации такого режима работы необходимо сжигать в топке котла  $Q_{\Gamma} = 8735 \text{ м}^3/\text{час}$  природного газа. Необходимый расход воздуха, который необходимо подать в топку котла, равняется 101 тыс. м<sup>3</sup>. В результате сжигания топлива образуются продукты сгорания, которые с учетом присосов воздуха через неплотности газоходов образуют расход уходящих газов  $Q_{YT} = 199,55 \text{ тыс. м}^3/\text{час}$ , который обеспечивает группа дымососов.

Как видно из рис. 3, наиболее эффективным способом регулирования производительности есть использование индивидуального привода для каждого из центробежных механизмов. При таком регулировании существуют такие параметры управления  $(\alpha^*, f^*)$ , при которых КПД механизма будет принимать максимально воз-

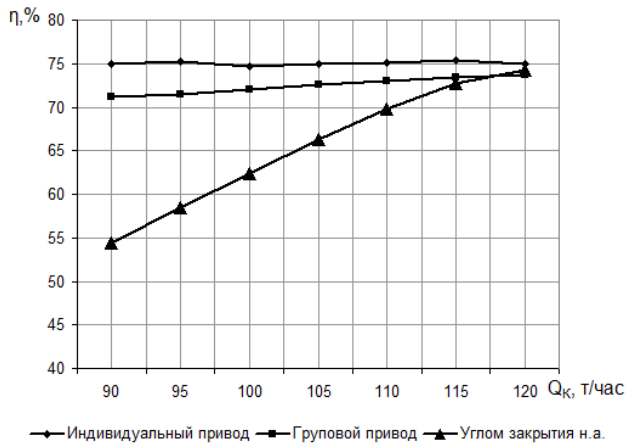


Рис. 3 – Значения средневзвешенного КПД группы центробежных механизмов котла при разных способах регулирования.

Исследования разных режимов работы котла показали, что при использовании одинаковых параллельно работающих центробежных механизмов максимум КПД достигается при равных расходах среды через них, а, следовательно, и параметры управления для них будут одинаковыми. На рис. 5 показана зависимость средневзвешенного КПД группы дымососов котла от производительности на одном из дымососов при общем расходе уходящих газов через группу в 200 тыс. м<sup>3</sup>/час. Как видно из рисунка, максимум КПД достигается при равном распределении расхода среды через дымососы.

Согласно техническим требованиям, в верхней точки топки необходимо поддержание разрежения на уровне 20 – 40 Па, а, следовательно, возникает задача анализа влияния разрежения в топке котла на эффективность работы центробежных механизмов газо-воздушного тракта.

На рис. 6 представлена зависимость средневзвешенного КПД группы центробежных механизмов от значения разрежения в топке котла при его паропроизводительности в 100 т/час. Как видно из рисунка, при индивидуальном приводе, разрежение в топке котла не влияет на средневзвешенный КПД группы механизмов, так как при таком способе регулирования обеспечивается максимально возможный КПД. Увеличение разрежения в топке приводит к росту напора, который должен быть обеспечен дымососами с одной стороны, но снижает напор дутьевых вентиляторов с другой. И на средневзвешенный КПД группы будут влиять более мощные механизмы (в рассматриваемой примере это дымососы).

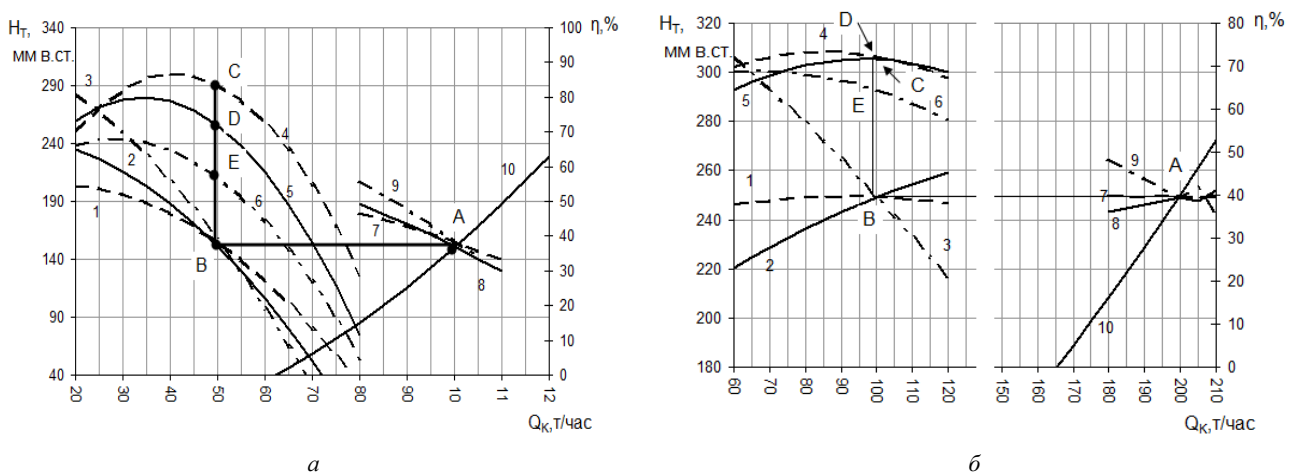


Рис. 4 – Работа механизмов на сеть при разных способах регулирования производительности:

- a* – характеристики дутьевого вентилятора ВДН-17-3; *б* – характеристики дымососа Д-18;  
 1, 2, 3 –  $H - Q$  характеристики при индивидуальном, групповом регулировании и изменении угла открытия н.а.;  
 4, 5, 6 –  $\eta - Q$  характеристика при индивидуальном, групповом регулировании и изменением угла открытия н.а.;  
 7, 8, 9 – эквивалентные  $H - Q$  характеристики параллельно работающих механизмов при индивидуальном, групповом регулировании и изменением угла открытия н.а.; 10 – характеристика сети.

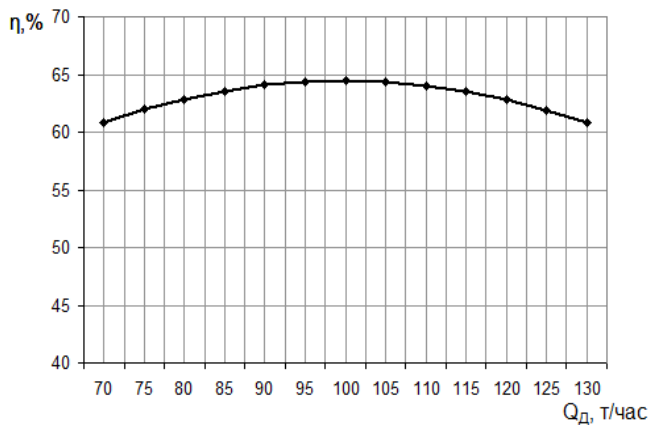


Рис. 5 – Зависимость средневзвешенного КПД группы из двух параллельно работающих дымососов при регулировании их производительности изменением угла открытия н.а.

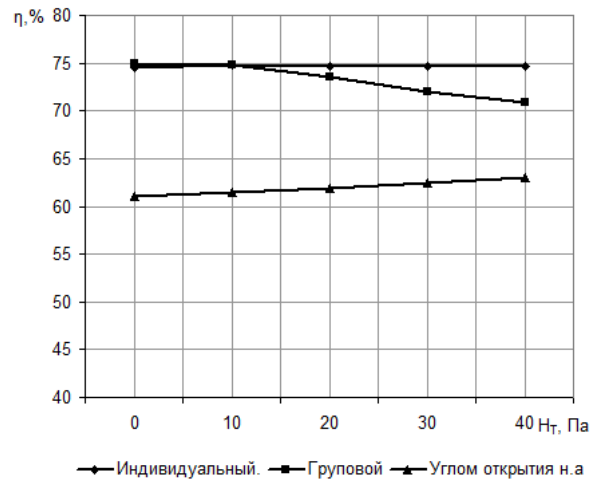


Рис. 6 – Зависимость средневзвешенного КПД группы центробежных механизмов от значения разрежения в топке котла при разных способах регулирования.

**Выводы.** В статье предложена математическая модель газозвдушного тракта парового энергетического котла. Поставлены задачи нахождения оптимальных параметров управления группой центробежных механизмов котла при разных способах регулирования их производительности.

Доказано, что наиболее эффективный способ регулирования производительности есть использование индивидуального частотного привода. Представлены результаты моделирования и найдены значения средневзвешенных КПД группы механизмов в диапазоне работы парового энергетического котла 90 – 120 т/час при разных способах регулирования их производительности.

Произведен анализ влияния распределения расходов между одинаковыми параллельно работающими центробежными механизмами. На примере двух дымососов Д-18 показано, что максимальный средневзвешенный КПД такой группы достигается при равной загрузке механизмов.

Также показано влияние разрежения в топке котла на средневзвешенный КПД механизмов при разных способах регулирования их производительности.

Анализ полученных результатов показал, что наиболее рациональный путь модернизации существующих ТЭС ведет к использованию индивидуального частотного привода для механизмов газозвдушного тракта котла. При ограниченных капиталовложениях возможно использование группового способа регулирования производительности таких механизмов ввиду его более низкой стоимости. Эффективность индивидуального частотного привода значительно превышает эффективность существующих способов регулирования производительности дымососов и дутьевых вентиляторов.

#### Список литературы

1. Лазуренко А. П., Кругол Н. М. Использование группового регулирования механизмами собственных нужд ТЭЦ для повышения КПД в летний период // Вісник НТУ «ХПИ». Сер. : Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2014. – № 56(1098). – С. 78 – 82.
2. Ванін В. А., Лазуренко О. П., Кругол М. М. Оптимальне електромеханічне керування гідродинамічними системами // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Сер. : Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – 2018. – № 195. – С. 18 – 20.
3. Проданов Л. В., Аганов А. П. Применение группового частотного регулирования для агрегатов собственных нужд маневренных блоков ТЭС // Энергетика. – 1990. – № 5. – С. 13 – 19.
4. Wang Shu-ping, Ye Jiantao, Li Wei, Du Xiaofeng, Chen Zinia. Energy efficiency evaluation investigation on high voltage inverter retrofit for fansand pumps in power plants (CIGRE Sessions 2012, Paris, France, August 26 – 31, 2012). – Режим доступу : [https://cigreindia.org/CIGRE%20Lib/Cigre%20Paris%202012/A1/A1\\_203\\_2012.pdf](https://cigreindia.org/CIGRE%20Lib/Cigre%20Paris%202012/A1/A1_203_2012.pdf). – Дата звертання : 15 січня 2020 р.
5. Лазарев Г. Б. Управление эффективностью механизмов собственных нужд ТЭС // Энергия единой сети. – 2013. – №5. – С. 58 – 67.
6. Ванін В. А., Лазуренко О. П., Кругол М. М. Математичні моделі та оптимізація роботи груп механізмів власних потреб ТЕС // Праці міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях». – Харків, 2020. – С. 55 – 59.
7. Пономарев А. А. Модель газозвдушного тракта теплоэнергетического котла как объекта регулирования // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – № 3(61). – С. 19 – 29.
8. Селезнев В. Е., Алешин В. В., Прялов С. Н. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов: методы, модели и алгоритмы. – М.: МАКС Пресс, 2007. – 695 с.
9. Костышин В. С. Моделирование режимов работы центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии. – Иванов-Франковск, 2000. – 163 с.

10. *Бойко А. Е., Деринг И. С., Охорзина Т. И.* Котельные установки и парогенераторы. Аэродинамический расчет котельных установок. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. – 72 с.
11. *Kruhol N., Lasurenko O., Vanin V.* Group Regulation Efficiency Analysis for Thermal Power Plant Auxiliaries // 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). Kiev, Ukraine, 17 – 19 April 2019. doi: 10.1109/ESS.2019.8764242.
12. *Ванин В. А., Кругол Н. М., Лазуренко А. П.* Математические модели систем обеспечения работы котлоагрегата ТЭС в задаче повышения его энергоэффективности // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2019. – Вип. 8 (1333). – С. 41 – 48.
13. *Бойко А. Е.* Котельные установки и парогенераторы. Тепловой расчет парового котла. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2005. – 96 с.
14. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. Изд. 3 -е, перераб. и доп. – С.-Петербург : НПО ЦКТИ – ВТИ, 1998. – 257 с.

## References (transliterated)

1. Lazurenko A. P., Krugol N. M. Ispol'zovanie gruppovogo regulirovaniya mekhanizmami sobstvennykh nuzhd TETS dlya povysheniya KPD v letniy period [Using thermal power plant own need group regulation mechanism for improving efficiency during summer period]. *Visnyk NTU «KhPI»*. Ser. : *Energetyka : nadiynist' ta energoefektyvnist'* [Bulletin of NTU "KhPI". Series : Energy: reliability and efficiency]. 2014, no. 56(1098), pp. 78–82.
2. Vanin V. A., Krugol M. M., Lazurenko O. P. Optymal'ne elektromekhanichne keruvannya gidrodynamichnykh systemamy [Optimal electrical and mechanical control of hydrodynamic machines]. *Visnyk Kharkiv's'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universytetu sil's'kogo gospodarstva imeni Petra Vasylenka*. Ser. : *Problemy energozabezpechennya ta energozberezhennya v APK Ukrainy* [Bulletin of the P. Vasilenko Kharkiv National Technical University of Agriculture. Series : Problems of power supply and energy saving in agro-industrial complex of Ukraine]. 2018, no. 195, pp. 18–20.
3. Prodanov L. V., Agapov A. P. Primenenie geuppovogo chastnogo regulirovaniya dlya agregatov sobstvennykh nuzhd manyevrennykh blokov TES [Using group frequency regulation for auxiliary aggregates of thermal power plant maneuverable units]. *Energetika* [Energetics]. 1990, no. 5, pp. 13–19.
4. Wang Shuping, Ye Jiantao, Li Wei, Du Xiaofeng, Chen Zinia. Energy efficiency evaluation investigation on high voltage inverter retrofit for fan-sand pumps in power plants (CIGRE Sessions 2012, Paris, France, August 26 – 31, 2012). Available at : [https://cigreindia.org/CIGRE%20Lib/Cigre%20Pairis%202012/A1/A1\\_203\\_2012.pdf](https://cigreindia.org/CIGRE%20Lib/Cigre%20Pairis%202012/A1/A1_203_2012.pdf) (accessed : 15.01.19).
5. Lazarev G. B. Upravlenie effektivnost'yu mekhanizmov sobstvennykh nuzhd TES [Controlling efficiency of thermal plant auxiliaries]. *Energiya edinoi seti* [Energetics of single network]. 2013, no. 5, pp. 58–67.
6. Vanin V. A., Lazurenko O. P., Krugol M. M. Matematychni modeli ta optymizatsiya roboty grup mekhanizmv vlasnykh potreb TES. [Mathematical model and optimization of operation of thermal plant auxiliaries]. *Pratsi mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi "Komp'yuterne modelyuvannya v naukozemnykh tekhnolohiyakh"* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Computer simulation in knowledge-intensive technologies"]. Kharkiv, 2020, pp. 55–59.
7. Ponomarev A. A. Model' gazovozdushnogo trakta teploenergeticheskogo kotla kak ob'ekta regulirovaniya [Model of air-gas path of heat and power boiler as a controlled system]. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU* [Collection of research papers of NTUU]. 2010, no. 3(61), pp. 19–29.
8. Seleznev V. E., Aleshin V. V., Pryalov S. N. *Matematicheskoe modelirovaniye truboprovodnykh setey i sistem kanalov : metody, modeli i algoritmy* [Mathematical modeling of pipeline systems and channelling: methods, models and algorithms]. Moscow, MAKS Press Publ., 2007. 695 p.
9. Kostyshin V. S. *Modelirovaniye rezhimov raboty centrobeznykh nasosov na osnove elektrogidravlicheskoy analogii* [Modeling centrifugal pump operation modes by electrohydraulic analogy]. Ivano-Frankovsk, 2000. 163 p.
10. Boyko A. E., Dering I. S., Okhorzina T. I. *Kotel'nye ustanovki i parogeneratory. Aerodinamicheskiy raschet kotel'nykh ustanovok* [Boiler plants and steam generators. Boiler plant aerodynamic analysis]. Krasnoyarsk, IPC KGTU Publ., 2006. 72 p.
11. *Kruhol N., Lasurenko O., Vanin V.* Group Regulation Efficiency Analysis for Thermal Power Plant Auxiliaries. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. Kiev, Ukraine, 17 – 19 April 2019. doi: 10.1109/ESS.2019.8764242.
12. Vanin V. A., Krugol N. M., Lazurenko A. P. Matematicheskie modeli sistem obespecheniya raboty kotloagregata TES v zadache povysheniya ego energoeffektivnosti [Mathematical models of thermal power plant boiler operation systems in the problem of the boiler energy efficiency improvement]. *Visnyk Natsional'nogo tekhnichnogo universytetu «KhPI»*. Seriya : matematychno modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh. [Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series : Mathematical modeling in engineering and technology]. 2019, vol. 8/2019 (1333), pp. 41–48.
13. Boyko A. E. *Kotel'nye ustanovki i parogeneratory. Teplovoiy raschet parovogo kotla* [Boiler plants and steam generators. Boiler plant thermal analysis]. Krasnoyarsk, IPC KGTU Publ., 2005. 96 p.
14. *Teplovoiy raschet kotel'nykh agregatov. Normativnyy metod. Izd. 3 -e, pererab. i dop.* [Boiler unit thermal analysis. Normative method. Ed. 3, updated and revised]. S.-Peterburg, NPO CKTI – VTI Publ., 1998. 257 p.

*Поступила (received) 16.01.2020*

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

**Ванин Віктор Антонович (Ванин Виктор Антонович, Vanin Viktor Antonovich)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057) 707-60-35; e-mail: plbvva5652xpi@gmail.com.

**Ванин Борис Вікторович (Ванин Борис Викторович, Vanin Boris Viktorovich)** – магістр факультету комп'ютерних наук, Харківський національний університет ім. В.Н.Каразіна, м. Харків; тел.: (057) 707-60-35; e-mail: plbvva5652xpi@gmail.com.

**Кругол Микола Михайлович (Кругол Николай Михайлович, Kruhol Nikolay Mikhaylovich)** – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057) 707-66-00; e-mail: kruhgol@gmail.com.