

УДК 621.3

**ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ КОМБИНИРОВАННОГО  
УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ УСТАНОВОК  
ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА С УЧЕТОМ  
ДИСКРЕТНОСТИ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ****Ю.В. Зубков, А.М. Абакумов, О.А. Абакумов<sup>1</sup>**Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: zub577@mail.ru, abakumov-am@yandex.ru, abakumovoleg1@gmail.com

**Аннотация.** Отмечены проблемы электромагнитной совместимости элементов электротехнического комплекса компрессорных станций магистральных газопроводов, возникающие при использовании частотно-регулируемого привода вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения природного газа. Обоснована целесообразность использования систем комбинированного управления, в которых аппараты воздушного охлаждения, входящие в состав установки охлаждения газа, разделены на две группы: с частотным и дискретным регулированием скорости вентиляторов. Обсуждается вопрос оптимизации алгоритмов управления электроприводами комбинированной системы по критерию мощности на валу вентиляторов. Разработан алгоритм оптимального взаимосвязанного управления скоростью вентиляторов и количеством включенных двигателей вентиляторов соответствующих групп аппаратов воздушного охлаждения, учитывающий дискретность управляющего воздействия. Дана оценка экономии мощности на валу вентиляторов при замене дискретного управления на комбинированное с использованием разработанного алгоритма управления. Предложено для реализации оптимального алгоритма использовать систему автоматического управления, замкнутую по температуре газа на выходе установки охлаждения. Проведен сравнительный анализ энергетических показателей процесса охлаждения и точности поддержания температуры при использовании разработанного алгоритма оптимального управления и алгоритма, не учитывающего дискретности управляющего воздействия. Показано, что использование последнего при относительно небольшом количестве аппаратов воздушного охлаждения может приводить к недопустимой погрешности стабилизации температуры на выходе установки охлаждения. Рассмотрена возможность использования упрощенных вариантов алгоритмов управления. На примере установки охлаждения, содержащей четыре двухвентиляторных аппарата воздушного охлаждения и работающей в условиях существенно неравномерной нагрузки, пока-



© Автор(ы), 2025

<sup>1</sup> Юрий Валентинович Зубков, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий.

Александр Михайлович Абакумов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электромеханики и автомобильного электрооборудования.

Олег Александрович Абакумов, аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

заны преимущества использования комбинированной системы управления, обеспечивающей существенный энергосберегающий эффект.

**Ключевые слова:** установки охлаждения природного газа, электропривод аппаратов воздушного охлаждения, комбинированные системы, алгоритмы управления.

## Введение

На компрессорных станциях магистральных газопроводов природный газ после компримирования охлаждают до заданной температуры. Охлаждение природного газа позволяет снизить затраты энергии на работу газоперекачивающих агрегатов в газотранспортной системе, повысить ее пропускную способность и надежность работы [1–6].

Для охлаждения природного газа на компрессорных станциях используются установки охлаждения газа (УОГ). Типовые УОГ содержат параллельно включенные аппараты воздушного охлаждения (АВО), основными элементами которых являются теплообменник и вентиляторы с электроприводом, подающие наружный воздух на теплообменник.

Электроприводы АВО на компрессорных станциях с газотурбинным приводом центробежных нагнетателей потребляют более 60 % электроэнергии, расходуемой на производственные нужды [4, 7–9], что определяет актуальность проблемы повышения энергоэффективности технологического процесса охлаждения газа.

Установка охлаждения должна обеспечивать снижение температуры компримированного газа до заданного  $\theta_r$  значения в условиях изменения температуры наружного воздуха, температуры газа после компримирования, расхода газа и других менее значимых возмущающих воздействий.

Температура газа на выходе УОГ определяется температурой компримированного газа  $\theta_{inp}$  на входе и температурным перепадом  $\Delta\Theta$ , создаваемым установкой охлаждения:

$$\theta_{out} = \theta_{inp} - \Delta\Theta.$$

В условиях действия возмущений для поддержания заданного значения температуры на выходе УОГ  $\theta_r$  необходимо управлять температурным перепадом, обеспечивая его требуемое значение:

$$\Delta\theta_r = \theta_{inp} - \theta_r.$$

Широко используемый дискретный способ управления температурным перепадом, реализуемый включением/отключением электродвигателей вентиляторов, обладает существенными недостатками. Он имеет низкие показатели энергоэффективности, не обеспечивает высокой точности поддержания температуры вследствие дискретности управляющего воздействия, частые затяжные пуски двигателей могут приводить к их перегреву и негативно влияют на питающую сеть.

Указанные недостатки в значительной мере устраняются при использовании непрерывного (частотного) управления скоростью вентиляторов на базе частотно-регулируемого привода (ЧРП). Для достижения высокой точности стабилизации требуемого значения температуры на выходе УОГ используют системы автоматического управления, замкнутые по температуре газа на выходе УОГ. Применение таких систем обеспечивает значительный энергосберегающий эффект [7–12].

Системы частотного регулирования, как показывают результаты теоретических и экспериментальных исследований [13–15], имеют существенный недостаток: при оснащении большого количества двигателей АВО преобразователями частоты возникают проблемы электромагнитной совместимости элементов электротехнического комплекса компрессорной станции, особенно в случае, когда электроснабжение комплекса осуществляется от источника ограниченной мощности – электростанции собственных нужд. Различные способы решения проблемы электромагнитной совместимости [15] связаны с существенными финансовыми затратами.

Для снижения негативного влияния ЧРП установки охлаждения на питающую сеть предложено использование систем комбинированного управления [16]. В системах комбинированного управления электродвигатели одной группы АВО оснащаются ЧРП, а для второй группы АВО используется дискретное регулирование.

Задача оптимизации алгоритмов управления электроприводами вентиляторов комбинированной системы управления в стационарных режимах рассмотрена в [16]. В [17–19] разработаны оптимальные алгоритмы управления, учитывающие нелинейность распределения температуры по длине теплообменника АВО и отличие их индивидуальных энергетических и тепловых характеристик, а также обсуждаются вопросы оценки снижения потребления электроэнергии при замене дискретного управления на комбинированное. В указанных работах при решении задачи оптимизации предполагается, что УОГ содержит достаточно большое количество АВО (более 10...12), что позволяет пренебречь дискретностью изменения управляющего воздействия в виде количества включенных двигателей вентиляторов и рассматривать это воздействие как непрерывную переменную.

В статье рассмотрена задача оптимизации алгоритмов управления электроприводами АВО комбинированной системы в стационарных режимах с учетом дискретности переменных, что актуально для УОГ с относительно небольшим количеством АВО, а также проведен анализ энергетических показателей комбинированного управления по сравнению с дискретным.

### **Энергетические показатели дискретного и комбинированного управления**

Примем следующие допущения: охлаждаемый газ равномерно распределяется по параллельно включенным АВО, энергетические и тепловые характеристики АВО идентичны, нелинейностью изменения температуры газа по длине теплообменника можно пренебречь.

Введем обозначения:  $N$  – общее количество двухвентиляторных АВО в составе УОГ;  $N_f$  – количество АВО с ЧРП вентиляторов;  $N_d = (N - N_f)$  – количество АВО с дискретным регулированием скорости вентиляторов; относительное количество АВО с ЧРП вентиляторов

$$\alpha = \frac{N_f}{N}, \quad 0 < \alpha < 1;$$

относительное количество АВО с дискретно-регулируемыми приводами

$$\frac{N - N_f}{N} = 1 - \alpha.$$

**Дискретное управление.** Количество АВО с дискретным регулированием скорости вентиляторов  $N_d = N$ . Температурный перепад  $\Delta\Theta_d$  на УОГ пропорционален количеству  $d_d$  включенных двигателей вентиляторов [7, 8, 16–19]. Общее количество двигателей вентиляторов двухвентиляторных АВО равно  $2N$ . Используем относительные единицы (о. е.). Для обеспечения требуемого температурного перепада  $\Delta\theta_d = \Delta\theta_r$  необходимое относительное количество включенных двигателей вентиляторов

$$\beta_d = \Delta\Theta_r^*; \Delta\Theta_r^* = \Delta\Theta_d^*; 0 \leq \Delta\Theta_r^* \leq 1, \quad (1)$$

где  $\beta_d = \frac{d_d}{2N}$  – относительное количество включенных двигателей вентиляторов;

$\Delta\Theta_d^* = \frac{\Delta\Theta_d}{\Delta\Theta_{nom}}$ ;  $\Delta\Theta_r^* = \frac{\Delta\Theta_r}{\Delta\Theta_{nom}}$  – относительные значения температурных перепадов;  $\Delta\Theta_{nom}$  – температурный перепад на УОГ при работе всех вентиляторов с номинальной скоростью  $n_{nom}$ .

Включение каждого двигателя вентилятора создает на выходе УОГ дополнительный относительный температурный перепад

$$\Delta\Theta_{d1}^* = \frac{1}{2N} \text{ о.е.} \quad (2)$$

Суммарная мощность на валу вентиляторов  $P_d$  определяется количеством включенных двигателей и зависит от требуемого температурного перепада:

$$P_d^* (\Delta\Theta_r^*) = \frac{P_d}{P_\Sigma} = \beta_d = \Delta\Theta_r^*, \text{ о.е.}, \quad (3)$$

где  $P_\Sigma = 2NP_{nom}$ ;  $P_{nom}$  – номинальная мощность двигателя вентилятора.

Включение каждого двигателя приводит к приращению мощности на величину

$$P_{d1}^* = \frac{1}{2N} \text{ о.е.} \quad (4)$$

**Комбинированное управление.** В комбинированной системе управляющими воздействиями на процесс охлаждения газа являются количество включенных двигателей вентиляторов и скорость вентиляторов соответствующих групп аппаратов воздушного охлаждения. Требуемый температурный перепад создается за счет взаимосвязанного изменения управляющих воздействий.

Электродвигатели вентиляторов частотной группы АВО работают с одинаковой скоростью и создают на выходе УОГ относительный температурный перепад, пропорциональный их относительному количеству  $\alpha$  и относительной скорости  $v$  [7–9, 16–19]:

$$\Delta\Theta_{fc}^* = \alpha v, \quad v = \frac{n}{n_{nom}}. \quad (5)$$

Относительная мощность на валу вентиляторов частотной группы АВО пропорциональна их количеству и кубу относительной скорости:

$$P_{fc}^* = \alpha v^3. \quad (6)$$

Относительный температурный перепад, создаваемый дискретно-регулируемой группой АВО,

$$\Delta\Theta_{dc}^* = \beta_c, \quad 0 \leq \beta_c \leq (1 - \alpha), \quad (7)$$

где  $d_c$  – количество включенных двигателей вентиляторов дискретно-регулируемой группы АВО в комбинированной системе;  $\beta_c = \frac{d_c}{2N}$  – относительное количество включенных двигателей вентиляторов дискретно-регулируемой группы АВО.

Общий температурный перепад на УОГ в комбинированной системе с учетом (5), (7):

$$\Delta \Delta\Theta_c^* = \beta_c + \alpha v.$$

В комбинированной системе, как и в дискретной, включение каждого двигателя вентилятора дискретно-регулируемой группы АВО создает на выходе УОГ дополнительный температурный перепад  $\Delta\Theta_{d1}^*$  и приращение мощности  $P_{d1}^*$  по (4).

Мощность на валу вентиляторов при комбинированном управлении с учетом (3), (6):

$$P_c^*(\Delta\Theta_r^*, \beta_c) = \beta_c + \alpha v^3. \quad (8)$$

Рассмотрим задачу оптимизации алгоритма управления электродвигателями вентиляторов АВО комбинированной системы по критерию суммарной мощности на валу вентиляторов с учетом дискретности изменения температурного перепада и мощности при переключениях двигателей.

На первом интервале оптимального управления требуемый температурный режим обеспечивается регулированием скорости вентиляторов частотно-регулируемой группы АВО. Требуемый температурный перепад на этом интервале изменяется от 0 до некоторого значения  $\Delta\Theta_0^*$ , при котором мощность  $P_{fc}^*$  по (5) не превышает мощности  $P_c^*$  по (8). На правой границе первого интервала скорость и мощность двигателей частотно-регулируемой группы АВО

$$v_0 = \frac{1}{\alpha} \Delta\Theta_0^*; \\ P_{fc}^*(\Delta\Theta_0^*) = \alpha v_0^3. \quad (9)$$

Включение двигателя дискретно-регулируемой группы АВО приводит к дополнительному температурному перепаду  $\Delta\Theta_{d1}^*$  и увеличению мощности дискретно-регулируемой группы АВО на  $P_{d1}^*$ . Требуемый температурный перепад частотно-регулируемой группы АВО соответственно уменьшается на  $\Delta\Theta_{d1}^*$ . Скорость и мощность двигателей этой группы снижаются до значений

$$v_{01} = \frac{1}{\alpha} (\Delta\Theta_0^* - \Delta\Theta_{d1}^*); \quad (10)$$

$$P_{f1}^*(\Delta\Theta_0^* - \Delta\Theta_{d1}^*) = \alpha v_{01}^3. \quad (11)$$

Для минимизации критерия оптимизации определим значение  $\Delta\Theta_0^*$  из условия

$$P_f^*(\Delta\Theta_0^*) = P_{f1}^*(\Delta\Theta_0^* - \Delta\Theta_{d1}^*) + P_{d1}^*.$$

Последнее выражение с учетом (9)–(11) можно преобразовать к виду квадратного уравнения:

$$3\Delta\Theta_0^{*2} - 3\Delta\Theta_{d1}^* \Delta\Theta_0^* + \Delta\Theta_{d1}^{*2} - \alpha^2 = 0.$$

Его решение дает искомое значение температурного перепада  $\Delta\Theta_0^*$ , при котором следует включать двигатель дискретно-регулируемой группы АВО.

На последующих  $2N_d$  интервалах управления, вплоть до заключительного, температурный режим поддерживается согласованным управлением скоростью и количеством включенных электродвигателей дискретно-регулируемой группы АВО.

Правая граница второго интервала управления определяется выражением

$$\Delta\Theta_0^* + \Delta\Theta_{d1}^*.$$

На каждом последующем интервале правая граница дополнительно сдвигается на  $\Delta\Theta_{d1}^*$ . На заключительном интервале управления, когда включены все двигатели дискретно-регулируемой группы АВО, необходимый температурный перепад обеспечивается частотно-регулируемой группой АВО.

Проиллюстрируем оптимальный алгоритм для следующих условий: общее количество АВО  $N = 4$ , к дискретной и частотно-регулируемой группам отнесено по два АВО:  $N_f = N_d = 2$ ,  $\alpha = 0.5$ ;  $0 \leq \beta_c \leq 0.5$ .

Рассчитанное по приведенным соотношениям значение правой границы первого интервала управления  $\Delta\Theta_0^* = 0.35$  о. е. Согласно (2)  $\Delta\Theta_{d1}^* = 0.125$  о. е.

Значение скорости на правой границе первого интервала

$$v_0 = \frac{1}{\alpha} \Delta\Theta_0^* = \frac{0.35}{0.5} = 0.7 \text{ о. е.}$$

На рис. 1 приведены зависимости переменных от требуемого температурного перепада. Они построены в соответствии с выполненными расчетами по приведенным выше выражениям.

Скорость  $v$  частотно-регулируемой группы АВО (график 1) на границах интервалов при подключении очередного двигателя вентилятора дискретно-регулируемой группы АВО (график 3) снижается на 0,25, о. е. В границах каждого интервала скорость линейно изменяется для создания требуемого температурного перепада на УОГ. На заключительном интервале, когда включены все двигатели дискретно-регулируемой группы, скорость нарастает до номинального значения. Фактический температурный перепад  $\Delta\theta^*$  (график 2) поддерживается равным требуемому.

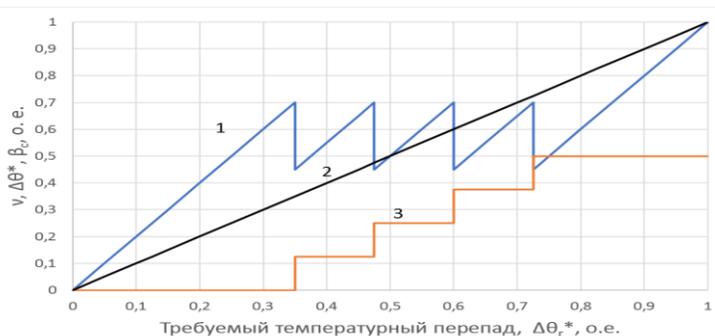


Рис. 1. Зависимость относительных значений переменных от требуемого температурного перепада для оптимального алгоритма управления с учетом дискретности: 1 – скорость вентиляторов; 2 – фактический температурный перепад; 3 – количество включенных дискретно-регулируемых двигателей

Для реализации рассмотренного алгоритма целесообразно использовать систему автоматического управления, замкнутую по температуре газа на выходе УОГ.

На рис. 2 приведены зависимости энергетических показателей от требуемого температурного перепада при оптимальном управлении.

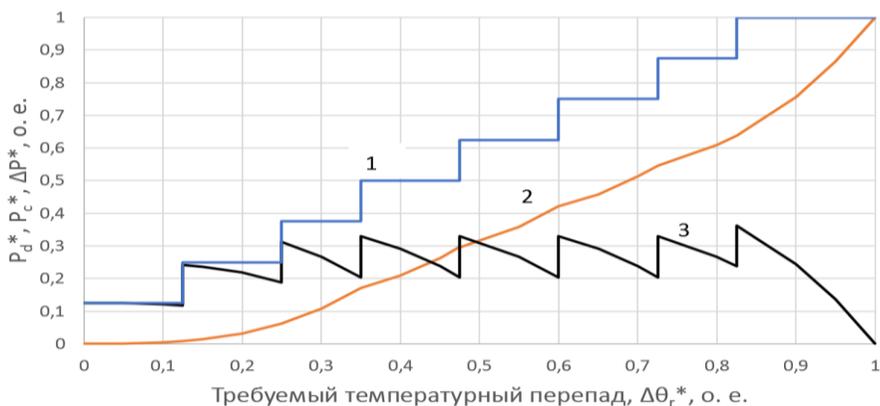


Рис. 2. Зависимость относительных значений мощности и экономии мощности от требуемого температурного перепада для оптимального алгоритма управления с учетом дискретности: 1 – дискретное управление; 2 – комбинированное управление; 3 – экономия мощности

Ступенчатый график 1 показывает изменение мощности при дискретном регулировании. График 2 отражает изменение мощности в комбинированной системе. Экономия мощности на валу вентиляторов (график 3) при замене дискретного управления на комбинированное определена в виде

$$\Delta P = P_d^*(\Delta\Theta_r^*) - P_c^*(\Delta\Theta_r^*, \beta_c).$$

Сравним показатели точности поддержания температуры и энергетические показатели полученного оптимального алгоритма управления с показателями алгоритма, разработанного без учета дискретности переменных.

В [16] рассмотрена задача минимизации мощности на валу двигателей вентиляторов АВО в комбинированной системе управления и показано, что в условиях изменения  $\Delta\Theta_r^*$  от 0 до 1 оптимальный алгоритм комбинированного управления, не учитывающий дискретности изменения мощности и температурного перепада при переключениях дискретно-регулируемых двигателей, содержит три интервала. На первом интервале требуемый температурный перепад обеспечивается изменением скорости частотно-регулируемой группы АВО. При этом их скорость определяется соотношением

$$v(\Delta\Theta_r^*) = \frac{1}{\alpha} \Delta\Theta_r^*.$$

Правая граница первого интервала  $(0, \Delta\Theta_{r1}^*)$  определяется выражением

$$\Delta\Theta_{r1}^* = \alpha v_{opt}.$$

На втором интервале управления  $(\Delta\Theta_{r1}^*, \Delta\Theta_{r2}^*)$  скорость вентиляторов поддерживается постоянной, равной оптимальной:

$$v_{opt} = \frac{1}{\sqrt{3}},$$

а требуемый температурный режим обеспечивается включением необходимого количества дискретно-регулируемых двигателей:

$$\beta_c(\Delta\Theta_r^*) = \Delta\Theta_r^* - \alpha v_{opt}.$$

Правая граница второго интервала определяется ограничением на количество дискретно-регулируемых двигателей:

$$\Delta\Theta_{r2}^* = \alpha v_{opt} + (1 - \alpha).$$

На третьем интервале управления  $(\Delta\Theta_{r2}^*, 1)$  температурный режим поддерживается изменением скорости ЧРП:

$$v(\Delta\Theta_r^*) = v_{opt} + \frac{1}{\alpha}(\Delta\Theta_r^* - \Delta\Theta_{r2}^*).$$

Рассмотрим точность поддержания температуры и энергетические показатели такого алгоритма для УОГ с приведенными выше параметрами: общее количество АВО  $N = 4$ ,  $N_f = N_d = 2$ ,  $\alpha = 0.5$ .

Расчетное значение правой границы первого интервала управления в соответствии с приведенными выше выражениями равно  $\Delta\Theta_{r1}^* = 0.29$  о. е.

Как показывает анализ, значение температурного перепада  $\Delta\Theta_0^*$  на правой границе первого интервала оптимального управления с учетом дискретности превышает соответствующее значение  $\Delta\Theta_{r1}^*$ , полученное без учета дискретности. Для  $\alpha = 0.5$  и четырех АВО это превышение составляет около 14 %, для двенадцати АВО – до 5 %.

Графики изменения переменных в относительных единицах для рассматриваемого варианта алгоритма управления приведены на рис. 3. График 1 отражает изменение скорости частотно-регулируемой группы АВО, график 3 – изменение количества включенных двигателей вентиляторов дискретно-регулируемой группы АВО. При использовании этого варианта алгоритма управления температура на выходе УОГ (график 2) изменяется вследствие дискретности регулирования. Наибольшая погрешность стабилизации температуры для принятого количества АВО согласно (2) составляет  $\Delta\Theta_{d1}^* = 0.125$  о. е. С увеличением количества АВО эта погрешность снижается; например, для двенадцати АВО она не превышает 0,042 о. е.

Наибольшая погрешность в именованных единицах зависит от температурного перепада  $\Delta\Theta_{nom}$  на УОГ при работе всех вентиляторов с номинальной скоростью и определяется выражением

$$\delta\theta = \Delta\Theta_{nom} \Delta\Theta_{d1}^*, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Например, при  $\Delta\Theta_{nom} = 20$  °С наибольшая погрешность для УОГ с четырьмя АВО составит 2,5 °С, а для УОГ с двенадцатью АВО она составит 0,83 °С.

Согласно стандарту «Газпром» [20] допустимая погрешность поддержания температуры в выходном коллекторе УОГ составляет  $\pm 1$  °С. Как свидетельствуют приведенные выше оценки, показатели погрешности поддержания температуры могут быть основным ограничивающим фактором для использования алгоритма управления, не учитывающего дискретность переменных.

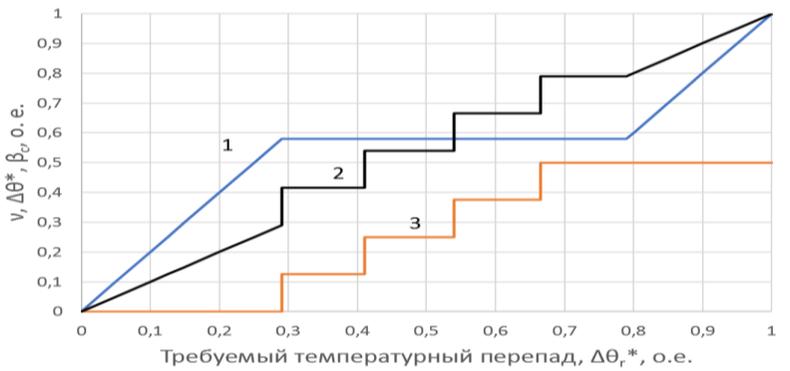


Рис. 3. Зависимость относительных значений переменных от требуемого температурного перепада для алгоритма управления без учета дискретности: 1 – скорость вентиляторов; 2 – фактический температурный перепад; 3 – количество включенных дискретно-регулируемых двигателей

Графики энергетических показателей при использовании алгоритма управления, не учитывающего дискретности переменных, приведены на рис. 4.

Ступенчатый график 1 показывает изменение мощности при дискретном регулировании. График 2 отражает изменение мощности в комбинированной системе. Экономия мощности на валу вентиляторов (график 3) немного ниже, чем при оптимальном управлении с учетом дискретности.

Оценим дополнительно показатели упрощенных алгоритмов комбинированного управления.

По упрощенному алгоритму для обеспечения требуемого температурного перепада на УОГ в первую очередь используется частотное управление, а затем подключаются двигатели дискретной группы.

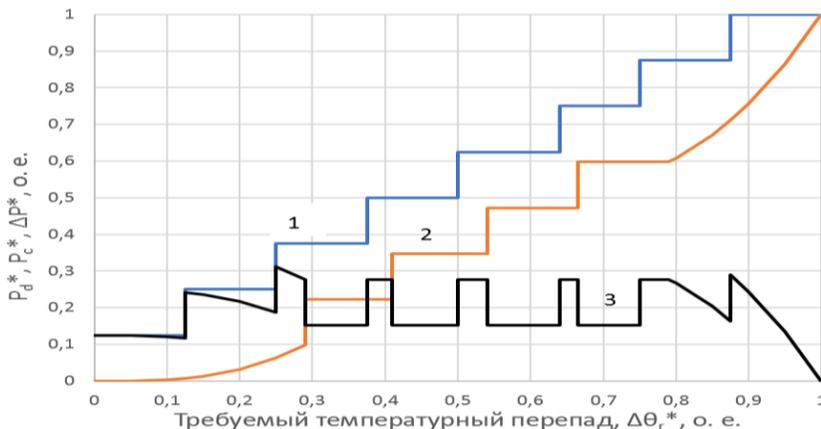


Рис. 4. Зависимость относительных значений мощности и экономии от требуемого температурного перепада для алгоритма управления без учета дискретности: 1 – дискретное управление; 2 – комбинированное управление; 3 – экономия мощности

Для принятых выше параметров УОГ графики управляющих воздействий при использовании упрощенного алгоритма приведены на рис. 5.

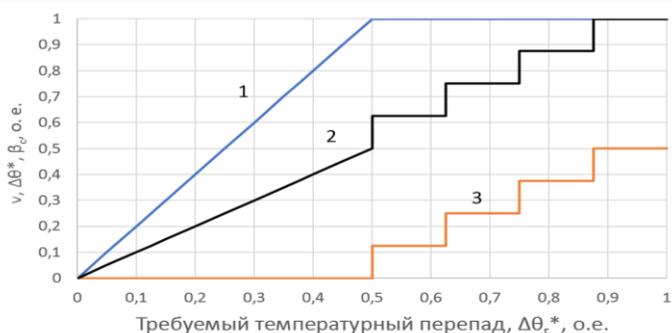


Рис. 5. Зависимость относительных значений переменных от требуемого температурного перепада для упрощенного алгоритма управления: 1 – скорость вентиляторов; 2 – фактический температурный перепад; 3 – количество включенных дискретно-регулируемых двигателей

Требуемый температурный перепад  $\Delta\theta_r^*$  на интервале от 0 до 0,5 о. е. обеспечивается изменением скорости вентиляторов частотно-регулируемой группы АВО (график 1 на рис. 5) от  $v=0$  до номинального значения  $v=1$  о. е. Фактический температурный перепад  $\Delta\theta^*$  на первом интервале управления в стационарных режимах поддерживается равным требуемому (график 2 на рис. 5).

Для  $\Delta\theta_r^* > 0,5$  скорость ограничена номинальным значением, а требуемый температурный перепад достигается включением двигателей дискретно-регулируемой группы АВО (график 3 на рис. 5). Дискретность управления, как и в предыдущем алгоритме, приводит к погрешности в поддержании требуемого температурного перепада.

Энергетические показатели упрощенного алгоритма представлены на рис. 6. Мощность на валу вентиляторов при частотном управлении (кривая 2 на рис. 6) изменяется в соответствии с (6). Для  $\Delta\theta_r^* > 0,5$  график 1 суммарной мощности совпадает с графиком мощности при дискретном регулировании. Экономия мощности (график 3) достигается только на интервале частотного управления.

Погрешности в поддержании требуемого значения температурного перепада могут быть устранены, если для значений  $\Delta\theta_r^* > 0,5$  использовать взаимосвязанное управление скоростью и количеством включенных двигателей вентиляторов, как в рассмотренном выше оптимальном алгоритме с учетом дискретности. Однако, как показал анализ, средняя экономия мощности при использовании такого алгоритма для значений  $\Delta\theta_r^* > 0,4$  о. е. примерно в 2 раза ниже, чем для оптимального.

### Пример использования результатов исследования

Рассмотрим эффективность применения комбинированного управления на примере установки охлаждения газа компрессорного цеха компрессорной станции Тольятти Тольяттинского ЛПУ МГ. В состав установки входит 4 двухвентиляторных АВО типа HUDSON ITALIANA, единичная номинальная мощность электродвигателя вентилятора 30 кВт.

Экономия мощности на валу вентиляторов зависит от режима работы установки, который можно характеризовать значением температурного перепада  $\Delta\Theta_r^*$ .

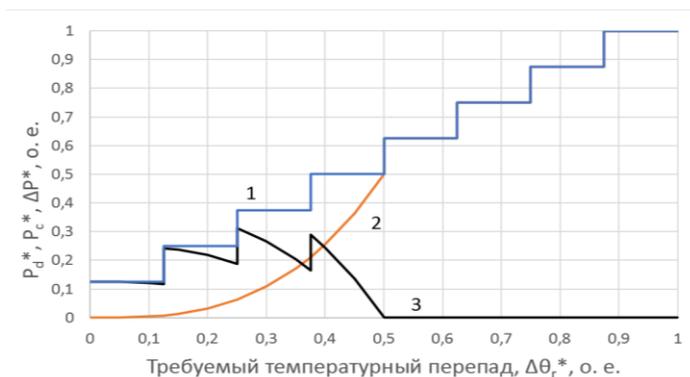


Рис. 6. Зависимость относительных значений мощности и экономии мощности от требуемого температурного перепада для упрощенного алгоритма управления: 1 – дискретное управление; 2 – комбинированное управление; 3 – экономия мощности

При дискретном способе управления, как показано в [18], средневзвешенное значение температурного перепада, с которым работала установка, совпадает с так называемым коэффициентом использования  $K_u$  активной мощности. Последний показатель широко используется в расчетах электрических нагрузок и определяется как отношение средней активной мощности отдельного приемника или группы электроприемников за некоторый период времени к ее номинальному значению [21, 22].

Средневзвешенное значение коэффициента использования при дискретном управлении может быть определено по данным о потреблении электроэнергии  $W_d$ :

$$K_u = \frac{W_d}{W_{nom}}$$

где  $W_{nom}$  – максимально возможный расход электроэнергии при постоянной работе электроприемников в течение цикла с номинальной мощностью.

Значение  $K_u$  при дискретном управлении с учетом (3) совпадает со значением требуемого температурного перепада  $\Delta\Theta_r^*$ .

Для определения значений  $K_u$  проведен анализ архивных данных о месячном потреблении электроэнергии  $W_d$  электроприемниками УОГ за 2022 г. Выявлено, что за рассматриваемый период установка пять месяцев работала со средневзвешенными коэффициентами использования  $0.1 < K_u < 0.2$ .

Оценим целесообразность использования в этих условиях частотного и комбинированного управления вместо дискретного.

Для варианта частотного управления, когда все двигателей АВО оснащены частотными преобразователями ( $\alpha = 1$ ), относительная скорость вентиляторов

определяется выражением  $v = \Delta\theta_r^* = K_u$  и составляет меньше 0,2 о. е. Минимальная скорость вентиляторов согласно требованиям [20] регламентируется значением  $0,2n_{ном}$  ( $v = 0,2$ ). Следовательно, в рассматриваемых условиях для повышения скорости частотно-регулируемых приводов и обеспечения ее допустимого значения часть ЧРП необходимо отключать, что приведет к снижению энергосберегающего эффекта.

Для варианта комбинированного управления и принятого выше разделения АВО на группы частотного и дискретного регулирования ( $\alpha = 0.5$ ) значению  $k_u = 0.1$  соответствует относительная скорость вентиляторов  $v = 2k_u = 0.2$  о.е. Следовательно, электроприводы частотно-регулируемой группы АВО рассматриваемой УОГ в течение всего года будут работать с допустимой скоростью. Приближенные расчеты экономии электроэнергии по методике, приведенной в [18], показали, что использование оптимального алгоритма комбинированного управления взамен дискретного при работе УОГ в режимах 2022 г. обеспечивает годовую экономию электроэнергии около 70 тыс. кВт·ч. При этом простой срок окупаемости [23] проекта модернизации при существующем соотношении цен на частотные преобразователи и электроэнергию не превысит двух лет.

### Выводы

1. В установках охлаждения природного газа, содержащих менее шести - восьми двух вентиляторных АВО, использование алгоритмов комбинированного управления электроприводами вентиляторов, не учитывающих дискретность изменения управляющего воздействия (количества включенных двигателей вентиляторов), не обеспечивает требуемой точности поддержания заданного значения температуры на выходе УОГ.

2. Разработанный алгоритм оптимального управления электроприводами вентиляторов АВО газа, учитывающий дискретность управляющего воздействия, содержит два интервала, на которых требуемый температурный режим обеспечивается частотно-регулируемой группой АВО, а также интервалы совместного согласованного управления скоростью ЧРП и количеством включенных дискретно-регулируемых приводов.

3. Использование разработанного алгоритма оптимального комбинированного управления для установок охлаждения с относительно небольшим количеством АВО обеспечивает высокую точность поддержания требуемого температурного режима и существенный энергосберегающий эффект.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоусенко И.В., Шварц Г.Р., Шпилевой В.А. Энергетика и электрификация газовых промыслов и месторождений. Тюмень, 2000. 274 с.
2. Шайхутдинов А.З., Лифанов В.А., Маланичев В.А. Современные АВО газа – ресурс энергосбережения в газовой отрасли // Газовая промышленность. 2010. № 9. С. 40–41.
3. Устинов Е.В. Уменьшение энергопотребления аппаратов воздушного охлаждения газа // Газовая промышленность. 2011. № 8. С. 54–57.
4. Меньшов Б.Г., Еришов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности. М.: Недра, 2000. 487 с.
5. Алимов С.В., Прокопец А.О., Кубаров С.В. и др. Модернизация вентиляторов АВО газа при реконструкции КС МГ // Газовая промышленность. 2009. № 4. С. 54–56.
6. Linde R. Advantage of pipelining gas at low temperatures // Pipe Line Industry. 1984. Vol. 55. No. 3. P. 49–56.

7. *Артюхов И.И., Аршакаян И.И., Крылов И.П.* Автоматическое управление аппаратами воздушного охлаждения на объектах магистрального транспорта газа // Мехатроника, автоматизация, управление. 2003. № 1. С. 33–36.
8. *Артюхов И.И., Аршакаян И.И., Тарисов Р.Ш., Тримбач А.А., Устинов Е.В.* Ресурсосберегающая технология охлаждения газа на компрессорных станциях // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. 2011. № 1 (54). Вып. 3. С. 25–32.
9. *Алимов С.В.* Повышение энергоэффективности стационарных режимов работы установок охлаждения газа с частотно-регулируемым электроприводом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара: СамГТУ, 2011. 24 с.
10. *Кумар Б.К., Выгонюк П.И.* Система автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения сырого природного газа // Вестник Казахского национального технического университета им. К.И. Сатнаева. 2011. № 1 (83). С. 67–71.
11. *Тримбач А.А.* Совершенствование электротехнических комплексов установок охлаждения компримированного газа: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Саратов: СГТУ, 2007. 24 с.
12. *Artyukhov I., Abakumov A., Zemtsov A., Yerbayev Y.* Energy Efficiency Analysis of Control Algorithms for Fan Electric Drives in Gas Air-Cooling Plants // International Conference on Efficient Production and Processing ICEPP 2021: Proceedings of ICEPP 2021. Lecture Notes in Civil Engineering. P. 46–55.
13. *Артюхов И.И., Аршакаян И.И., Жабский М.В., Коротков А.В., Погodin Н.В., Тримбач А.А.* Некоторые аспекты применения частотно-регулируемого электропривода в системах воздушного охлаждения компримированного газа // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 1(100). Вып. 1. С. 20–29.
14. *Артюхов И.И., Бочкарева И.И., Тримбач А.А.* Качество электроэнергии в системе электроснабжения газотурбинной компрессорной станции в условиях оснащения установок охлаждения газа частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 4(60). Вып. 2. С. 165–170.
15. *Бочкарева И.И.* Обеспечение электромагнитной совместимости частотно-регулируемых установок охлаждения газа с источниками электроснабжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Саратов: СГТУ, 2012. 19 с.
16. *Абакумов А.М., Кузнецов П.К.* Комбинированное управление электроприводами вентиляторов установок охлаждения газа // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2021. № 3. С. 67-82. DOI: 10.14498/tech.2021.3.4. EDN: SACBVTX.
17. *Абакумов А.М., Зубков Ю.В., Абакумов О.А.* Оптимизация стационарных режимов работы установок охлаждения газа с частотно-регулируемым приводом вентиляторов // Известия вузов. Электромеханика. 2024. Т. 67, № 1. С. 36-45. DOI: 10.17213/0136-3360-2024-1-36-45. EDN: NSATJU.
18. *Абакумов А.М., Зубков Ю.В., Абакумов О.А.* Оптимизация алгоритмов комбинированного управления электроприводами установок охлаждения природного газа // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. 2024. Т. 32, № 2. С. 103–118. DOI: 10.14498/tech.2024.2.6. EDN: FXTJLU.
19. *Абакумов А.М., Зубков Ю.В., Абакумов О.А.* Энергосберегающие режимы работы установок охлаждения природного газа // Электричество. 2025. № 1. С. 50–57. DOI: 10.24160/0013-5380-2025-1-50-57. EDN: QTIOEY.
20. *СТО Газпром 2-3.5-510-2010.* Установки и аппараты воздушного охлаждения газа. Технические требования.
21. *Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Сайгаиш А.С.* Основы электроснабжения: учеб. пособие. 2-е изд., доп. Томск: ТПУ, 2014. 174 с.
22. *Радкевич В.Н., Козловская В.Б., Колосова И.В.* Расчет электрических нагрузок промышленных предприятий: учебно-методическое пособие для студентов. Минск: БНТУ, 2013. 124 с.
23. *Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В.* Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. М.: Академия, 2008. 208 с.

*Статья поступила в редакцию 07.07.2025*

## ALGORITHMS OPTIMIZATION FOR COMBINED NATURAL GAS COOLING UNITS CONTROL OF ELECTRIC DRIVES TAKING INTO ACCOUNT THE DISCRETENESS OF CONTROL EFFECT

*Yu. V. Zubkov, A. M. Abakumov, O. A. Abakumov<sup>1</sup>*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: zub577@mail.ru, abakumov-am@yandex.ru, abakumovoleg1@gmail.com

**Abstract.** *The problems of main gas pipelines compressor stations electromagnetic compatibility electrical complex of elements, arising when using a frequency-controlled drive of air-cooling devices fans for natural gas, are noted. The feasibility of using combined control systems is substantiated, in which air cooling devices included in the gas cooling unit are divided into two groups: with frequency and discrete regulation of fan speed. The control algorithms optimization issue for electric drives of a combined system by the criterion of power on the fan shaft is discussed. An algorithm for fan speed optimal interconnected control and the number of switched-on fan motors of the air-cooling devices corresponding groups is developed, taking into account the discreteness of the control action. An assessment is given of the power savings on the fan shaft when replacing discrete control with a combined one using the developed control algorithm. It is proposed to use an automatic control system closed by the gas temperature at the outlet of the cooling unit for implementing the optimal algorithm. A comparative the cooling process analysis the energy indicators and the accuracy of temperature maintenance was carried out using the developed optimal control algorithm and an algorithm that does not take into account the discreteness of the control action. It was shown that the use of the latter with a relatively small number of air cooling devices can lead to an unacceptable error in stabilizing the temperature at the outlet of the cooling unit. The control algorithms possibility of using simplified versions is considered. The advantages of using a combined control system, providing a significant energy-saving effect, are shown using the example of a cooling unit containing four two-fan air-cooling devices and operating under conditions of a significantly uneven load.*

**Keywords:** *natural gas cooling units, electric drives for air cooling units, combined systems, control algorithms.*

### REFERENCES

1. *Belousenko I.V., Shvarc G.R., Shpilevoj V.A.* Energetika i elektrifikaciya gazovyh promyslov i mestorozhdenij [Power engineering and electrification of gas fields and deposits]. Tyumen, 2000. 274 p. (In Russian)



© The Author(s), 2025

<sup>1</sup> *Yury V. Zubkov (Dr. Sci. (Techn.)), professor, Head Dept. of Industrial Power Supply. Alexander M. Abakumov (Dr. Sci. (Techn.)), professor, professor Dept. of Electromechanics and Automotive Electrical Equipment.*

*Oleg A. Abakumov, Postgraduate Student Dept. of Industrial Power Supply.*

2. *Shajhutdinov A.Z., Lifanov V.A., Malanichev V.A.* Sovremennye AVO gaza – resursy energosberezheniya v gazovoy otrasli [Modern gas air coolers are a resource for energy saving in the gas industry] // *Gazovaya promyshlennost'*. 2010. № 9. P. 40–41. (In Russian)
3. *Ustinov E.V.* Umenshenie energopotrebleniya apparatov vozdušnogo ohlazhdeniya gaza [Reducing energy consumption of air-cooled gas units] // *Gazovaya promyshlennost'*. 2011. № 8. P. 54–57. (In Russian)
4. *Menshov B.G., Ershov M.S., Yarizov A.D.* Elektrotekhnicheskie ustanovki i komplekсы v neftegazovoy promyshlennosti [Electrical installations and complexes in the oil and gas industry]. M.: Nedra, 2000. 487 p. (In Russian)
5. *Alimov S.V., Prokopec A.O., Kubarov S.V. i dr.* Modernizaciya ventilyatorov AVO gaza pri rekonstrukcii KS MG [Modernization of MG CS gas AVO fans during reconstruction] // *Gazovaya promyshlennost'*. 2009. № 4. P. 54–56. (In Russian)
6. *Linde R.* Advantage of pipelining gas at low temperatures // *Pipe Line Industry*. 1984. Vol. 55. No. 3. P. 49–56.
7. *Artyuhov I.I., Arshakyan I.I., Krylov I.P.* Avtomaticheskoe upravlenie apparatami vozdušnogo ohlazhdeniya na obektah magistralnogo transporta gaza [Automatic control of air cooling units at gas main transportation facilities] // *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie*. 2003. № 1. P. 33–36. (In Russian)
8. *Artyuhov I.I., Arshakyan I.I., Tarisov R.SH., Trimbach A.A., Ustinov E.V.* Resursosberezgayushchaya tekhnologiya ohlazhdeniya gaza na kompressornyh stanciyah [Resource-saving technology for gas cooling at compressor stations] // *Vestnik Saratovskogo gos. tekhn. un-ta*. 2011. № 1(54). Vyp. 3. P. 25–32. (In Russian)
9. *Alimov S.V.* Povyshenie energoeffektivnosti stacionarnyh rezhimov raboty ustanovok ohlazhdeniya gaza s chastotno-reguliruemym elektroprivodom [Improving the stationary operating modes energy efficiency of gas cooling units with a frequency-controlled electric drive]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Samara: SamGTU, 2011. 24 p. (In Russian)
10. *Kumar B.K., Vygoniyuk P.I.* Sistema avtomaticheskogo upravleniya apparatami vozdušnogo ohlazhdeniya syrogo prirodnogo gaza [Automatic control system for air cooling units of raw natural gas] // *Vestnik kazahskogo nacionalnogo tekhnicheskogo universiteta im. K.I. Satnaeva*. 2011. № 1 (83). P. 67–71. (In Russian)
11. *Trimbach A.A.* Sovershenstvovanie elektrotekhnicheskikh kompleksov ustanovok ohlazhdeniya komprimirovannogo gaza [Improvement of compressed gas cooling units electrical complexes]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Saratov: SGTU, 2007. 24 p. (In Russian)
12. *Artyukhov I., Abakumov A., Zemtsov A., Yerbayev Y.* Energy Efficiency Analysis of Control Algorithms for Fan Electric Drives in Gas Air-Cooling Plants // *International Conference on Efficient Production and Processing ICEPP 2021: Proceedings of ICEPP 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*. P. 46–55.
13. *Artyuhov I.I., Arshakyan I.I., Zhabskij M.V., Korotkov A.V., Pogodin N.V., Trimbach A.A.* Nekotorye aspekty primeneniya chastotno-reguliruemogo elektroprivoda v sistemah vozdušnogo ohlazhdeniya komprimirovannogo gaza [Some aspects of the use of variable frequency electric drives in compressed gas air cooling systems] // *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006. № 1(100). Vyp. 1. P. 20–29. (In Russian)
14. *Artyuhov I.I., Bochkareva I.I., Trimbach A.A.* Kachestvo elektroenergii v sisteme elektrosnabzheniya gazoturbinoj kompressornoj stancii v usloviyah osnashcheniya ustanovok ohlazhdeniya gaza chastotno-reguliruemym elektroprivodom ventilyatorov [Quality of electricity in the power supply system of a gas turbine compressor station when gas cooling units are equipped with frequency-controlled electric fan drives] // *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011. № 4(60). Vyp. 2. P. 165–170. (In Russian)
15. *Bochkareva I.I.* Obespechenie elektromagnitnoj sovmestimosti chastotno-reguliruemyh ustanovok ohlazhdeniya gaza s istochnikami elektrosnabzheniya [Ensuring Electromagnetic Compatibility of Frequency-Controlled Gas Cooling Plants with Power Supply Systems]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Saratov: SGTU, 2012. 19 p. (In Russian)
16. *Abakumov A.M., Kuznecov P.K.* Kombinirovannoe upravlenie elektroprivodami ventilyatorov ustanovok ohlazhdeniya gaza [Combined control of electric drives for fans of gas cooling units] // *Vestnik SamGTU. Ser. Tekhnicheskie nauki*. 2021. № 3. P. 67–82. DOI: 10.14498/tech.2021.3.4. (In Russian)
17. *Abakumov A.M., Zubkov Yu.V., Abakumov O.A.* Optimizaciya stacionarnyh rezhimov raboty ustanovok ohlazhdeniya gaza s chastotno-reguliruemym privodom ventilyatorov [Optimization of stationary operating modes of gas cooling units with frequency-controlled fan drives] //

- Izvestiya vuzov. Elektromekhanika. 2024. T. 67, № 1. P. 36–45. DOI: 10.17213/0136-3360-2024-1-36-45. (In Russian)
18. *Abakumov A.M., Zubkov Yu.V., Abakumov O.A.* Optimizatsiya algoritmov kombinirovannogo upravleniya elektroprivodami ustanovok ohlazhdeniya prirodnogo gaza [Algorithms optimization for combined natural gas cooling units control of electric drives] // Vestnik SamGTU. Ser. Tekhnicheskie nauki. 2024. V. 32, № 2. P. 103–118. DOI: 10.14498/tech.2024.2.6. (In Russian)
  19. *Abakumov A.M., Zubkov Yu.V., Abakumov O.A.* Energoberegayushchie rezhimy raboty ustanovok ohlazhdeniya prirodnogo gaza [Energy-saving modes of natural gas operation cooling units] // Elektrichestvo. 2025. № 1. P. 50–57. DOI: 10.24160/0013-5380-2025-1-50-57. (In Russian)
  20. STO Gazprom 2-3.5-510-2010. Ustanovki i apparaty vozdušnogo ohlazhdeniya gaza [STO Gazprom 2-3.5-510-2010. Installations and apparatus for air cooling of gas]. Tekhnicheskie trebovaniya. (In Russian)
  21. *Sivkov A.A., Gerasimov D.Yu., Sajgash A.S.* Osnovy elektrosnabzheniya: uchebnoe posobie. 2-e izd., dop [Electrical Basics: A Tutorial]. Tomsk: TPU, 2014. 174 p. (In Russian)
  22. *Radkevich V.N., Kozlovskaya V.B., Kolosova I.V.* Raschet elektricheskikh nagruzok promyshlennykh predpriyatij: uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov. Minsk: BNTU, 2013. 124 p. (In Russian)
  23. *Ilinskij N.F., Moskalenko V.V.* Elektroprivod: energo- i resursosberezhenie [Electric drive: energy and resource saving]. M.: Akademiya, 2008. 208 p. (In Russian)

*Original article submitted 07.07.2025*