

УДК 621.3

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ КОМБИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ УСТАНОВОК ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Ю.В. Зубков, А.М. Абакумов, О.А. Абакумов¹

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

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

Аннотация. Обоснована актуальность проблемы снижения энергопотребления электроприводов установок охлаждения природного газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов. Рассмотрена возможность решения этой проблемы с помощью системы комбинированного управления, содержащей две группы аппаратов воздушного охлаждения газа: с непрерывно и дискретно регулируемой скоростью электроприводов вентиляторов. Получен алгоритм оптимального по критерию максимальной экономии мощности управления, учитывающий особенности распределения температуры по длине теплообменника аппарата охлаждения. Показано, что в условиях ограничений на управляющие воздействия алгоритм оптимального управления состоит из нескольких интервалов. Получены соотношения для расчета оптимальной скорости электроприводов вентиляторов первой группы, количества включенных электроприводов вентиляторов аппаратов второй группы и экономии мощности на отдельных интервалах управления. Оценено влияние количества аппаратов с непрерывным регулированием скорости вентиляторов на величину экономии мощности. Обсуждена возможность использования упрощенной методики оценки экономии электроэнергии по усредненным показателям режима работы установки охлаждения.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, установки охлаждения природного газа, частотно-регулируемый привод, оптимизация алгоритмов управления.

Введение

Для обеспечения требуемых режимов транспортировки природного газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов осуществляют компримирование газа с последующим охлаждением перед подачей в линейную часть газопровода.

Охлаждение и стабилизация температуры газа обеспечивают повышение надежности и эффективности функционирования магистральных газопроводов.

¹ Юрий Валентинович Зубков, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий».

Александр Михайлович Абакумов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

Олег Александрович Абакумов, аспирант кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

Установки охлаждения газа (УОГ) на компрессорных станциях с газотурбинным приводом газоперекачивающих агрегатов потребляют более половины электроэнергии, расходуемой на производственные нужды, что определяет актуальность задачи повышения их энергоэффективности. Для решения этой задачи ведутся исследования, направленные как на совершенствование конструкции аппаратов воздушного охлаждения (АВО) [1–4], так и на оптимизацию алгоритмов управления электроприводами вентиляторов АВО [5–13].

Для управления температурой газа на выходе установки охлаждения используют различные способы. Типовые установки охлаждения газа, как правило, содержат значительное количество параллельно включенных аппаратов воздушного охлаждения с общим коллектором на входе и выходе установки. Большинство АВО, как например широко используемый на отечественных УОГ аппарат типа АВГ-75, выполняются с двумя вентиляторами, приводимыми в движение асинхронными короткозамкнутыми двигателями номинальной мощностью 37 кВт.

В стационарном режиме установка охлаждения создает температурный перепад (глубину охлаждения), определяемый разностью температур на ее входе θ_{inp} и выходе θ_{out} :

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

Величина температурного перепада $\Delta\Theta$ установки зависит от суточного и сезонного хода температуры наружного воздуха, расхода газа, его температуры на входе УОГ. Для стабилизации температуры на выходе установки в условиях действия указанных возмущений необходимо управлять величиной температурного перепада $\Delta\Theta$, то есть обеспечивать требуемый температурный перепад:

$$\Delta\Theta = \Delta\theta_r. \quad (1)$$

Дискретное и рациональное дискретное управление

Основным способом управления температурой на выходе, используемым на большинстве установок охлаждения, является изменение количества включенных электродвигателей вентиляторов (дискретное управление).

Для разделения потоков охлаждающего воздуха отдельных вентиляторов в конструкции современных АВО используются диффузоры. Благодаря этому каждый вентилятор направляет поток охлаждающего воздуха на половину теплообменника.

В стационарных режимах температурный перепад вдоль теплообменника АВО при работе двух вентиляторов изменяется по нелинейному закону [5–7]. В результате температурный перепад $\Delta\theta_1$, создаваемый при работе двигателя одного вентилятора, больше дополнительного температурного перепада $\Delta\theta_2$ от двигателя второго вентилятора. Обозначим отношение указанных температурных перепадов:

$$\gamma = \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_a}. \quad (2)$$

Для определенных конструктивных параметров АВО при постоянном расходе газа значение γ остается неизменным и может быть определено по паспортным тепловым характеристикам аппарата или на основе экспериментальных данных. Так, для АВО типа 2АВГ-75 значение $\gamma \approx 0,6$ [6, 7]. Представим температурный перепад на АВО в виде суммы температурного перепада $\Delta\theta_1$ при

включении одного двигателя вентилятора и дополнительного температурного перепада $\Delta\theta_2$ при включении второго двигателя вентилятора:

$$\Delta\theta_a = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2. \quad (3)$$

Согласно (2) и (3)

$$\Delta\theta_1 = \gamma\Delta\theta_a, \Delta\theta_2 = (1-\gamma)\Delta\theta_a. \quad (4)$$

Очевидно, что для снижения расхода электроэнергии на нужды охлаждения в первую очередь необходимо включать по одному электродвигателю на каждом АВО, а затем при необходимости подключать вторые двигатели. Назовем такой алгоритм управления рациональным дискретным.

Используя допущение об идентичности характеристик аппаратов и равномерном распределении охлаждаемого газа по параллельно включенным аппаратам, на основании уравнения теплового и материального баланса температурный перепад на УОГ при рациональном дискретном управлении можно представить с учетом (4) в виде

$$\Delta\theta_d(N_1, N_2) = \begin{cases} \frac{\gamma\Delta\theta_a N_1}{N}, & 0 \leq N_1 \leq N, \\ \gamma\Delta\theta_a + (1-\gamma)\frac{\Delta\theta_a N_2}{N}, & 0 \leq N_2 \leq N, \end{cases} \quad (5)$$

где N_1 , N_2 – количество АВО с одним и двумя включенными двигателями вентиляторов соответственно; N – количество АВО.

Температурный перепад на УОГ при работе всех электродвигателей с номинальной скоростью

$$\Delta\Theta_{nom} = \frac{\Delta\theta_a N}{N} = \Delta\theta_a.$$

Принимая за базовую величину температурного перепада значение $\Delta\Theta_{nom} = \Delta\theta_a$, представляем соотношения (5) в относительных единицах (о.е.):

$$\Delta\theta_d^*(\beta_{1d}, \beta_{2d}) = \begin{cases} \gamma\beta_{1d}, & 0 \leq \beta_{1d} \leq 1, \\ \gamma + (1-\gamma)\beta_{2d}, & 0 \leq \beta_{2d} \leq 1, \end{cases} \quad (6)$$

где $\beta_{1d} = \frac{N_1}{N}$, $\beta_{2d} = \frac{N_2}{N}$ – относительное число АВО с одним и двумя включенными двигателями вентиляторов соответственно.

Учитывая, что температурный перепад на УОГ должен быть равен требуемому:

$$\Delta\theta_r^* = \frac{\Delta\Theta_d}{\Delta\theta_a}, \quad 0 \leq \Delta\theta_r^* \leq 1,$$

из выражений (6) находим зависимости требуемого относительного числа включенных двигателей вентиляторов от относительного температурного перепада:

$$\beta_{1d}(\Delta\theta_r^*) = \frac{\Delta\theta_r^*}{\gamma}, \quad 0 \leq \Delta\theta_r^* \leq \gamma, \quad (7)$$

$$\beta_{2d}(\Delta\theta_r^*) = \frac{\Delta\theta_r^* - \gamma}{1-\gamma}, \quad \gamma \leq \Delta\theta_r^* \leq 1. \quad (8)$$

Учитывая значительное количество АВО в составе типовых УОГ, можно без существенной для оценочных расчетов погрешности пренебречь дискретностью β_{1d} , β_{2d} , β_{0d} и рассматривать их как непрерывные величины.

Суммарную мощность двигателей вентиляторов УОГ принимаем за базовое значение мощности:

$$P_{\Sigma} = P_1 2N,$$

где P_1 – мощность одного двигателя АВО.

Принимая во внимание (7), (8), представляем мощность на валу двигателей вентиляторов в относительных единицах как функцию требуемого температурного перепада:

$$P_d^*(\Delta\theta_r^*) = \begin{cases} 0,5 \frac{\Delta\theta_r^*}{\gamma}, & 0 \leq \Delta\theta_r^* \leq \gamma, \\ 0,5 \frac{\Delta\theta_r^* - \gamma}{1 - \gamma}, & \gamma \leq \Delta\theta_r^* \leq 1. \end{cases}$$

В случае, когда управление осуществляют без учета отличия температурных перепадов $\Delta\theta_1$ и $\Delta\theta_2$ (дискретное управление, $\gamma = 0,5$), температурный перепад на УОГ и мощность определяются числом N_{0d} включенных двигателей вентиляторов:

$$\Delta\Theta_{0d}(N_{0d}) = 0,5 N_{0d} \Delta\theta_a, \quad P_{0d}(N_{0d}) = N_{0d} P_1, \quad 0 \leq N_{0d} \leq 2N.$$

Или в относительных единицах

$$\Delta\Theta_{0d}^*(\beta_{0d}) = \Delta\theta_r^* = 0,5 \beta_{0d}, \quad P_{0d}^*(\beta_{0d}) = 0,5 \beta_{0d}, \quad 0 \leq \beta_{0d} \leq 2,$$

где $\beta_{0d} = \frac{N_{0d}}{N}$ – относительное количество включенных двигателей вентиляторов.

Для дискретного управления зависимость требуемой относительной мощности двигателей вентиляторов от требуемого температурного перепада принимает вид:

$$P_{0d}^*(\Delta\theta_r^*) = \Delta\theta_r^*. \quad (9)$$

Экономия мощности при использовании рационального дискретного управления вместо дискретного

$$\Delta P_1^*(\Delta\theta_r^*) = P_{0d}^*(\Delta\theta_r^*) - P_d^*(\Delta\theta_r^*), \quad (10)$$

или в процентном отношении к мощности при дискретном управлении

$$\Delta p_1(\Delta\theta_r^*) = 100 \frac{P_{0d}^*(\Delta\theta_r^*) - P_d^*(\Delta\theta_r^*)}{P_{0d}^*(\Delta\theta_r^*)} \%.$$

Комбинированное управление

В последнее время все большее применение получают системы непрерывного регулирования температуры газа на выходе УОГ, в которых для привода вентиляторов используются частотно-регулируемые приводы (ЧРП). Такие системы обеспечивают значительную экономию электроэнергии, потребляемой на нужды охлаждения. В то же время оснащение электродвигателей всех АВО преобразователями частоты связано с существенными финансовыми вложениями и приво-

дит к проблемам электромагнитной совместимости электрооборудования, для решения которых требуются затраты на дополнительное оборудование, в частности на фильтрокомпенсирующие устройства [14, 15].

Одним из возможных способов решения указанных проблем является использование систем комбинированного управления. В таких системах АВО делятся на две группы: одна группа оснащается ЧРП вентиляторов, а для второй используется приводы с дискретно регулируемой скоростью [8, 10].

Вопросы оптимизации режимов работы комбинированных систем без учета особенностей температурного распределения в двухвентиляторных АВО рассмотрены в [10]. Исследуем возможность дополнительного снижения потребления электроэнергии приводами УОГ за счет оптимизации алгоритмов управления с учетом указанных выше отличий температурных перепадов на АВО при работе одного и двух двигателей вентиляторов.

Введем обозначения:

– относительное количество АВО с ЧРП вентиляторов

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

где N_f – количество АВО с ЧРП вентиляторов;

– относительное количество АВО с дискретно управляемыми приводами

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

– относительное число АВО с дискретно управляемыми приводами с одним и двумя включенными двигателями вентиляторов

$$\beta_{1c} = \frac{N - N_f}{N}; \quad \beta_{2c} = \frac{N - N_f}{N}.$$

Необходимый порядок включения двигателей и ограничения на их число представляем в виде:

$$\begin{aligned} &\text{при } 0 \leq \beta_{1c} \leq 1 - \alpha, \quad \beta_{2c} = 0; \\ &\text{при } \beta_{1c} = 1 - \alpha, \quad 0 \leq \beta_{2c} \leq 1 - \alpha. \end{aligned} \quad (11)$$

Принимая во внимание, что относительный температурный перепад на аппарате с ЧРП пропорционален относительной скорости v вентиляторов [6, 10, 11], общий относительный температурный перепад, создаваемый на УОГ аппаратами первой группы, представим в виде

$$\Delta\theta_f^*(v) = \alpha v, \quad 0 \leq v \leq 1, \quad (12)$$

где $v = \frac{n}{n_{nom}}$ – отношение текущей скорости вентилятора к номинальной.

Температурный перепад, обусловленный АВО с дискретно управляемой скоростью вентиляторов, определяем аналогично (6) с учетом (11):

$$\Delta\theta_{dc}^*(v, \beta_{1c}, \beta_{2c}) = \begin{cases} \gamma\beta_{1c}, & 0 \leq \beta_{1c} \leq 1 - \alpha, \\ \gamma(1 - \alpha) + (1 - \gamma)\beta_{2c}, & 0 \leq \beta_{2c} \leq 1 - \alpha. \end{cases}$$

Относительный температурный перепад на УОГ при комбинированном управлении находим как сумму температурных перепадов, создаваемых первой и второй группами АВО:

$$\Delta\theta_c^*(\beta_{1c}, \beta_{2c}) = \begin{cases} \alpha v + \gamma\beta_{1c}, & 0 \leq \beta_{1c} \leq 1 - \alpha, \\ \alpha v + \gamma(1 - \alpha) + (1 - \gamma)\beta_{2c}, & 0 \leq \beta_{2c} \leq 1 - \alpha. \end{cases} \quad (13)$$

Мощность на валу вентиляторов АВО с ЧРП пропорциональна их относительной скорости в третьей степени [6, 8–12]. Принимая, как и выше, за базовую величину суммарную мощность электродвигателей УОГ, относительную мощность на валу вентиляторов АВО с ЧРП представляем в виде

$$P_f^*(v) = \alpha v^3.$$

Суммарная относительная мощность на валу двигателей при комбинированном управлении и условиях (11)

$$P_c^*(v, \beta_{1c}, \beta_{2c}) = \begin{cases} \alpha v^3 + 0,5\beta_{1c}, & 0 \leq \beta_{1c} \leq 1 - \alpha, \\ \alpha v^3 + 0,5(1 - \alpha) + 0,5\beta_{2c}, & 0 \leq \beta_{2c} \leq 1 - \alpha. \end{cases} \quad (14)$$

Принимаем за критерий оптимизации экономии мощности при переходе от дискретного управления к комбинированному:

$$\Delta P_2^*(v, \beta_{1c}, \beta_{2c}) = P_{0d}^* - P_c^*(v, \beta_{1c}, \beta_{2c}).$$

Согласно (9) представляем выражение для экономии мощности в виде

$$\Delta P_2^*(v, \beta_{1c}, \beta_{2c}) = \Delta\theta_r^* - P_c^*(v, \beta_{1c}, \beta_{2c}). \quad (15)$$

Задача оптимизации заключается в нахождении управляющих воздействий v , β_{1c} , β_{2c} , доставляющих максимум критерию (15) при ограничениях на управляющие воздействия (11), (12), и выполнении технологических требований (1). Для ее решения используем метод неопределенных множителей Лагранжа. В условиях изменения требуемого температурного перепада $0 \leq \Delta\theta_r^* \leq 1$ ограничения на управляющие воздействия приводят к появлению в алгоритме оптимального управления отдельных интервалов.

Приравняв первое уравнение в (13) требуемому температурному перепаду на УОГ, получаем уравнение связи:

$$g_1(v, \beta_{1c}) = \alpha v + \gamma\beta_{1c} - \Delta\theta_r^* = 0. \quad (16)$$

Функция Лагранжа

$$L_1(v, \beta_{1c}, \lambda_1) = \Delta P_2^* + \lambda_1 g_1(v, \beta_{1c}) = \Delta\theta_r^* - (\alpha v^3 + 0,5\beta_{1c}) + \lambda_1 [\alpha v + \gamma\beta_{1c} - \Delta\theta_r^*], \quad (17)$$

где λ_1 – неопределенный множитель Лагранжа.

Находим частные производные от функции Лагранжа по управляющим переменным и λ и приравниваем их нулю:

$$\frac{\partial L_1(v, \beta_{1c}, \lambda_1)}{\partial \beta_{1c}} = -0,5 + \lambda_1 \gamma = 0; \quad (18)$$

$$\frac{\partial L_1(v, \beta_{1c}, \lambda_1)}{\partial v} = -3v^2 + \lambda_1 \alpha = 0; \quad (19)$$

$$\frac{\partial L_1(v, \beta_{1c}, \lambda_1)}{\partial \lambda_1} = \alpha v + \gamma\beta_{1c} - \Delta\theta_r^* = 0. \quad (20)$$

Из (18) находим значение неопределенного множителя Лагранжа

$$\lambda_1 = \frac{1}{2\gamma},$$

и, подставляя его в (19), получаем выражение для оптимальной скорости

$$v_{1opt} = \frac{1}{\sqrt{6\gamma}}. \quad (21)$$

Температурный перепад, соответствующий v_{1opt} ,

$$\Delta\theta_{r1}^* = \alpha v_{1opt}. \quad (22)$$

Из (20) находим

$$\beta_{1c}(\Delta\theta_r^*) = \frac{\Delta\theta_r^* - \Delta\theta_{r1}^*}{\gamma}. \quad (23)$$

Из (23) следует, что для неотрицательности β_{1c} должно выполняться условие $\Delta\theta_r^* \geq \Delta\theta_{r1}^*$. Таким образом, на первом интервале особого управления $(0, \Delta\theta_{r1}^*)$ необходимо принять $\beta_{1c} = 0$, то есть регулирование температурного режима на этом интервале должно осуществляться только аппаратами с ЧРП. Их скорость определяется из условия (16) обеспечения требуемого температурного перепада:

$$v_1(\Delta\theta_r^*) = \frac{\Delta\theta_r^*}{\alpha}. \quad (24)$$

Значение $\Delta\theta_{r1}^*$ по (22) определяет правую границу первого интервала управления.

Мощность на валу двигателей вентиляторов на первом интервале и на его правой границе с учетом (24)

$$P_{1c}^*(\Delta\theta_r^*) = \alpha \left(v_1(\Delta\theta_r^*) \right)^3, \quad P_{1c}^*(\Delta\theta_{r1}^*) = \alpha \left(v_1(\Delta\theta_{r1}^*) \right)^3.$$

Экономия мощности на первом и последующих интервалах управления определяется выражением (15).

На втором интервале управления $(\Delta\theta_{r1}^*, \Delta\theta_{r2}^*)$ оптимальная скорость остается неизменной, $v_2(\Delta\theta_r^*) = v_{1opt}$, а требуемый температурный режим обеспечивается за счет использования АВО с одним включенным двигателем вентиляторов. Их необходимое количество определяется соотношением (23).

На рис. 1 показан пример зависимостей скорости v и количества АВО с одним β_{1c} и двумя β_{2c} включенными двигателями вентиляторов (в примере принято $\alpha = 0,5$; $\gamma = 0,6$).

Правая граница второго интервала управления соответствует ограничению $\beta_{1c} = 1 - \alpha$ и определяется выражением

$$\Delta\theta_{r2}^* = \Delta\theta_{r1}^* + \gamma(1 - \alpha). \quad (25)$$

Мощность на втором интервале управления и на его правой границе

$$\begin{aligned} P_{2c}^*(\Delta\theta_r^*) &= P_{1c}^*(\Delta\theta_{r1}^*) + 0,5\beta_{1c}(\Delta\theta_r^*), \\ P_{2c}^*(\Delta\theta_{r2}^*) &= P_{1c}^*(\Delta\theta_{r1}^*) + 0,5(1 - \alpha). \end{aligned} \quad (26)$$

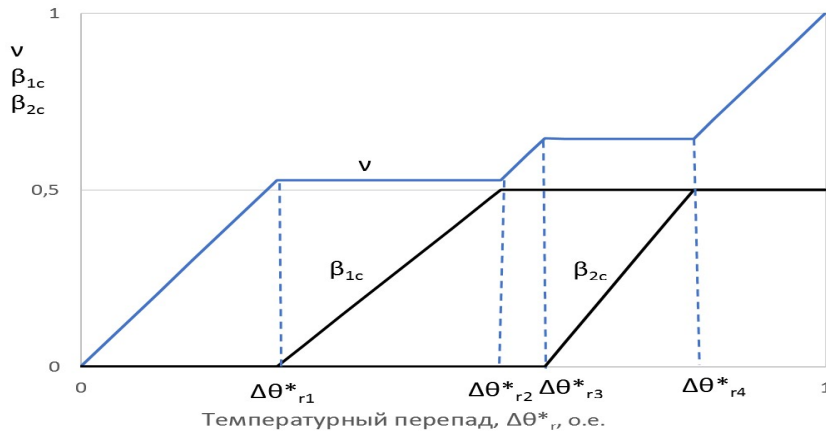


Рис. 1. Зависимости относительной скорости v и относительного количества АВО с одним β_{1c} и двумя β_{2c} включенными двигателями вентиляторов от требуемого температурного перепада $\Delta\theta_r^*$, о.е.

Чтобы найти алгоритм управления для $\Delta\theta_r^* > \Delta\theta_{r2}^*$, рассматриваем вторые уравнения в (13), (14). Уравнение связи (16) и функция Лагранжа (17) трансформируются к виду

$$\begin{aligned} g_2(v, \beta_{2c}) &= \alpha v + \gamma(1 - \alpha) + (1 - \gamma)\beta_{2c} - \Delta\theta_r^*, \\ L_2(v, \beta_{2c}, \lambda_2) &= \Delta P_2^* + \lambda_2 g_2(v, \beta_{2c}) = \Delta\theta_r^* - \left(\alpha v^3 + 0,5(1 - \alpha) + 0,5\beta_{2c} \right) + \\ &+ \lambda_2 \left[\alpha v + \gamma(1 - \alpha) + (1 - \gamma)\beta_{2c} - \Delta\theta_r^* \right]. \end{aligned}$$

Аналогично предыдущему находим

$$\frac{\partial L_2(v, \beta_{2c}, \lambda_2)}{\partial \beta_{2c}} = -0,5 + \lambda_2(1 - \gamma) = 0;$$

$$\frac{\partial L_2(v, \beta_{1c}, \lambda_1)}{\partial v} = -3v^2 + \lambda_2\alpha = 0;$$

$$\frac{\partial L_2(v, \beta_{1c}, \lambda_1)}{\partial \lambda_1} = \alpha v + \gamma(1 - \alpha) + (1 - \gamma)\beta_{2c} - \Delta\theta_r^* = 0; \quad (27)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2(1 - \gamma)}; \quad v_{2opt} = \frac{1}{\sqrt{6(1 - \gamma)}}. \quad (28)$$

Учитывая выражения (22), (25), температурный перепад, соответствующий v_{2opt} , можно представить в виде

$$\Delta\theta_{r3}^* = \Delta\theta_{r2}^* + \alpha(v_{2opt} - v_{1opt}).$$

Из (27) находим

$$\beta_{2c}(\Delta\theta_r^*) = \frac{\Delta\theta_r^* - \Delta\theta_{r2}^*}{1 - \gamma}. \quad (29)$$

Согласно (29) для неотрицательности β_{2c} должно выполняться условие $\Delta\theta_r^* \geq \Delta\theta_{r2}^*$. Следовательно, на третьем интервале особого управления

$(\Delta\theta_{r2}^*, \Delta\theta_{r3}^*)$ количество АВО с двумя включенными двигателями вентиляторов $\beta_{2c} = 0$, а требуемый температурный режим обеспечивается за счет управления скоростью вентиляторов первой группы АВО. Требуемая скорость определяется из уравнения связи (16) и после преобразований может быть представлена в виде

$$v_3(\Delta\theta_r^*) = v_{1opt} + \frac{1}{\alpha}(\Delta\theta_r^* - \Delta\theta_{r2}^*).$$

Мощность на валу вентиляторов на третьем интервале особого управления и на его правой границе

$$\begin{aligned} P_{3c}^*(\Delta\theta_r^*) &= P_{2c}^*(\Delta\theta_{r2}^*) + \alpha(v_3(\Delta\theta_r^*))^3; \\ P_{3c}^*(\Delta\theta_{r3}^*) &= P_{2c}^*(\Delta\theta_{r2}^*) + \alpha(v_3(\Delta\theta_{r3}^*))^3. \end{aligned}$$

На четвертом интервале оптимального управления $(\Delta\theta_{r3}^*, \Delta\theta_{r4}^*)$ скорость вентиляторов АВО с ЧРП остается неизменной, $v_4(\Delta\theta_r^*) = v_{2opt}$, а требуемый температурный перепад обеспечивается изменением количества АВО с двумя включенными двигателями вентиляторов.

Ограничение $\beta_{2c} \leq (1 - \alpha)$ определяет правую границу четвертого интервала управления:

$$\Delta\theta_{r4}^* = \Delta\theta_{r3}^* + (1 - \alpha)(1 - \gamma).$$

Мощность на валу вентиляторов на четвертом интервале управления и его правой границе

$$\begin{aligned} P_{4c}^*(\Delta\theta_r^*) &= P_{3c}^*(\Delta\theta_{r3}^*) + 0,5\beta_{2c}(\Delta\theta_r^*); \\ P_{4c}^*(\Delta\theta_{r4}^*) &= P_{3c}^*(\Delta\theta_{r3}^*) + 0,5(1 - \alpha). \end{aligned}$$

На пятом интервале особого управления требуемый температурный режим обеспечивается регулированием скорости вентиляторов АВО первой группы. Требуемая скорость определяется согласно уравнению связи (16):

$$v_5(\Delta\theta_r^*) = v_{2opt} + \frac{1}{\alpha}(\Delta\theta_r^* - \Delta\theta_{r4}^*).$$

Мощность на пятом интервале

$$P_{5c}^*(\Delta\theta_r^*) = P_{4c}^*(\Delta\theta_{r4}^*) + \alpha(v_5(\Delta\theta_r^*))^3.$$

На рис. 2 приведены графики экономии мощности при рациональном дискретном управлении

$$\Delta P_1^*(\Delta\theta_r^*) = P_{od}^*(\Delta\theta_r^*) - P_d^*(\Delta\theta_r^*)$$

и оптимальном комбинированном управлении для значения $\alpha = 0,5$

$$\Delta P_2^*(\Delta\theta_r^*) = P_{od}^*(\Delta\theta_r^*) - P_{ic}^*(\Delta\theta_r^*), \quad i = \overline{1,5}. \quad (30)$$

На этом же рисунке показан график экономии мощности для алгоритма комбинированного управления, не учитывающего нелинейность изменения температуры по длине теплообменника (для $\gamma = 0,5$).

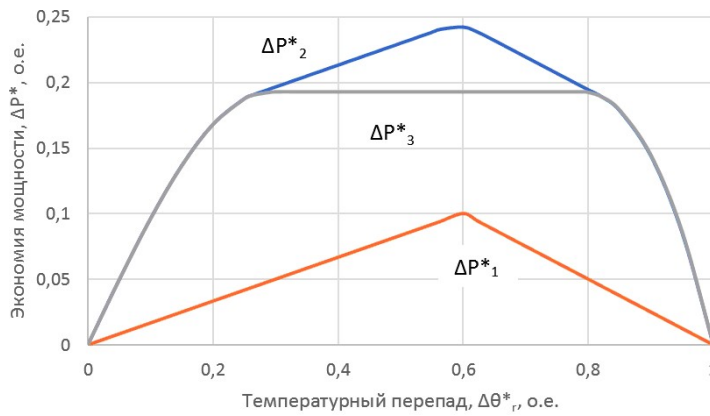


Рис. 2. Зависимости экономии мощности от требуемого температурного перепада: ΔP_1^* – рациональное дискретное управление; ΔP_2^* – оптимальное комбинированное управление; ΔP_3^* – комбинированное управление для $\gamma = 0,5$

Оценим влияние доли АВО с ЧРП на экономию мощности при оптимальном комбинированном управлении и комбинированном управлении для $\gamma = 0,5$.

Наибольшее значение экономии мощности ΔP_m^* в варианте оптимального комбинированного управления достигается на правой границе второго интервала управления при $\Delta \theta_r^* = \Delta \theta_{r2}^*$. Значение ΔP_m^* определяется подстановкой в (30) выражений (22), (25), (26) и может рассматриваться как функция относительного количества α аппаратов с ЧРП. За относительный показатель экономии принимаем отношение экономии мощности $\Delta P_m^*(\alpha)$ к мощности при дискретном управлении в процентах:

$$\Delta p_2(\alpha) = 100 \frac{\Delta P_m^*(\alpha)}{P_{od}^*(\Delta \theta_{r2}^*)} \%.$$

График $\Delta p_2(\alpha)$ приведен на рис. 3.

Аналогично найдена зависимость относительной экономии мощности $\Delta p_3(\alpha)$ при условии $\Delta \theta_r^* = \Delta \theta_{r2}^*$ для алгоритма комбинированного управления, не учитывающего нелинейность распределения температуры по длине теплообменника АВО ($\gamma = 0,5$) [10]. На рис. 3 представлен график $\Delta p_3(\alpha)$, а также график разности

$$\Delta p_{2-3}(\alpha) = \Delta p_2(\alpha) - \Delta p_3(\alpha).$$

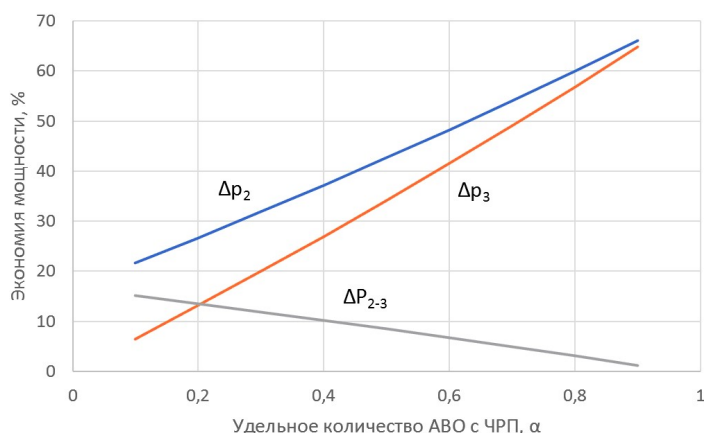


Рис. 3. Зависимости относительной экономии мощности от удельного количества АВО с ЧРП: Δp_2 – оптимальное комбинированное управление; Δp_3 – комбинированное управление для $\gamma = 0,5$; Δp_{2-3} – дополнительная экономия мощности

Алгоритм оптимального комбинированного управления, учитывающий особенности температурного распределения по длине теплообменника АВО, например для $\alpha = 0,5$, обеспечивает уменьшение потребной мощности на 8,5 % по сравнению с алгоритмом комбинированного управления для $\gamma = 0,5$. Значение Δp_{2-3} возрастает при уменьшении значения α .

Оценка энергетической эффективности оптимизации

Чтобы оценить энергетическую эффективность применения ЧРП вентиляторов АВО, необходимо сопоставить дополнительные затраты на реализацию проекта со стоимостью сэкономленной электроэнергии [16]. Методика расчета экономии электроэнергии при полностью частотном управлении электроприводами АВО с учетом нелинейной зависимости экономии от требуемого температурного перепада приведена в [17].

Для приближенной оценки энергоэффективности оптимального комбинированного управления целесообразно рассматривать экономию мощности $\Delta P_2^*(\Delta \theta_r^*)$ по выражению (30), отнесенную к мощности при дискретном управлении:

$$\Delta p_2(\Delta \theta_r^*) = \frac{\Delta P_c^*(\Delta \theta_r^*)}{\Delta P_{od}^*(\Delta \theta_r^*)}.$$

Следует отметить, что в реальных условиях эксплуатации режимы работы со значениями $\Delta \theta_r^*$, близкими к 0 и 1, как правило, не используются. Первый из них (значение $\Delta \theta_r^* \approx 0$) соответствует низкой температуре наружного воздуха, когда требуемый температурный перепад может быть обеспечен за счет конвективного теплообмена при отключенных двигателях вентиляторов. Второй режим (значение $\Delta \theta_r^* \approx 1$) возникает при температуре наружного воздуха, близкой к темпера-

туре газа на входе в УОГ. В этом случае двигатели вентиляторов отключают из-за неэффективности их работы.

Расчетный график зависимости $\Delta p_2(\Delta\theta_r^*)$ для $\alpha = 0,5$ и рабочих значений $\Delta\theta_r^*$ приведен на рис. 4.

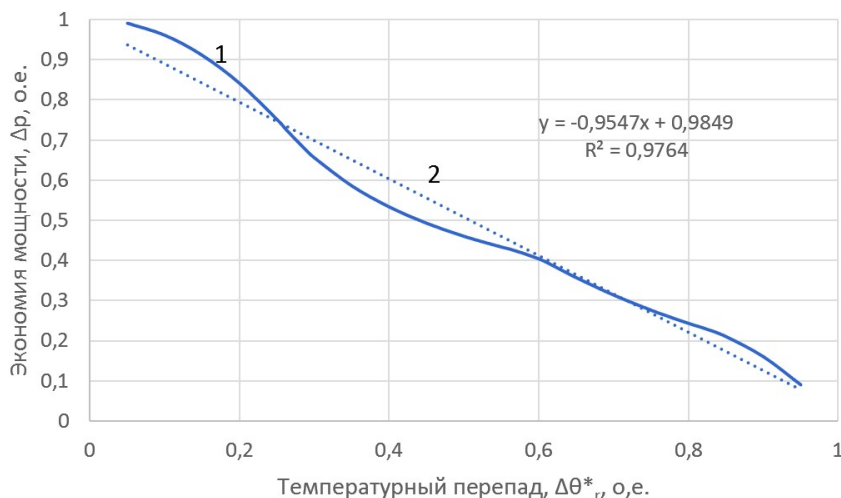


Рис. 4. Графики зависимости экономии мощности от требуемого температурного перепада: 1 – оптимальное комбинированное управление $\Delta p_2(\Delta\theta_r^*)$; 2 – линейная аппроксимация $\Delta p_2(\Delta\theta_r^*)$

В рассматриваемом варианте комбинированного управления нелинейная зависимость $\Delta p_2(\Delta\theta_r^*)$ с высоким значением величины достоверности ($R^2 = 0,976$) может быть аппроксимирована линейной функцией:

$$\Delta p_2(\Delta\theta_r^*) = 0,9547 - 0,9849\Delta\theta_r^*. \quad (31)$$

Благодаря этому оценочные расчеты экономии электроэнергии можно проводить по среднему значению $\Delta\theta_{rm}^*$. Учитывая (9), можно показать, что

$$\Delta\theta_{rm}^* = P_{0d}^* = \frac{W_{0d}}{P_{\Sigma} T_r \eta_r},$$

где W_{0d} – электроэнергия, потребленная за определенное время T_r работы, например за год, конкретной УОГ с дискретным управлением приводами вентиляторов (определяется по приборам учета электроэнергии); η_d – КПД дискретно регулируемых приводов.

Рассчитывая по выражению (31) значение $\Delta p_2(\Delta\theta_{rm}^*)$ и пренебрегая отличием КПД дискретно и частотно-регулируемых приводов, определяем экономию электроэнергии в именованных единицах:

$$\Delta W_2 = W_{0d} \Delta p_2(\Delta\theta_{rm}^*).$$

Простой срок окупаемости проекта использования оптимального комбинированного управления взамен дискретного определяется соотношением [16]

$$T_c = \frac{k\alpha NC_f}{C_e \Delta W_2},$$

где k – повышающий коэффициент, учитывающий затраты на разработку проекта, дополнительное оборудование, включая преобразователи частоты, монтаж и наладку системы управления; C_f – стоимость преобразователя частоты; C_e – тариф на потребленную электроэнергию.

Из последнего выражения следует, что при прочих равных условиях срок окупаемости проекта модернизации зависит от соотношения цен на электроэнергию и единичную мощность ЧРП и должен определяться с учетом динамики их изменения.

Выводы

1. На широко применяемых двухвентиляторных аппаратах воздушного охлаждения газа вследствие нелинейного распределения температуры газа по длине теплообменника температурный перепад при включении одного вентилятора отличается от дополнительного температурного перепада, обусловленного включением второго вентилятора.

2. Алгоритм оптимального комбинированного управления электродвигателями вентиляторов УОГ, построенный с учетом этого эффекта, позволяет дополнительно сократить потребление электроэнергии на нужды охлаждения.

3. Действие ограничений на управляющие воздействия приводит к появлению нескольких интервалов в алгоритме оптимального управления. На отдельных интервалах управления требуемый температурный перепад на УОГ обеспечивается включением необходимого количества дискретно регулируемых приводов вентиляторов при неизменной оптимальной скорости частотно-регулируемых приводов, на интервалах особого управления требуемый температурный перепад создается изменением скорости ЧРП вентиляторов.

4. Дополнительная экономия мощности от учета неравномерного распределения температуры по длине теплообменника возрастает при уменьшении удельного числа АВО с ЧРП вентиляторов. Оценочные расчеты экономии мощности и электроэнергии при использовании оптимального алгоритма комбинированного управления целесообразно проводить по средним значениям требуемого температурного перепада на УОГ, которые могут быть выявлены на основании анализа потребления электроэнергии на УОГ с дискретным регулированием скорости вентиляторов.

5. Разработанная методика позволяет провести сравнительный анализ энергетической эффективности различных вариантов построения систем управления электроприводами установок охлаждения газа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алимов С.В., Проконев А.О., Кубаров С.В. и др. Модернизация вентиляторов АВО газа при реконструкции КС МГ // Газовая промышленность. 2009. № 4. С. 54–56.
2. Маланичев В.А., Миатов О.Л., Типайлов А.М. Разработка и модернизация вентиляторных блоков аппаратов воздушного охлаждения // Химическая техника. 2004. № 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://techno-cons.ru/files/23_08_2013_114.pdf

3. *Шайхутдинов А.З., Лифанов В.А., Маланичев В.А.* Современные АВО газа – ресурс энергосбережения в газовой отрасли // Газовая промышленность. 2010. № 9. С. 40–41.
4. *Linde R.* Advantage of pipelining gas at low temperatures // Pipe Line Industry. 1984. Vol. 55. No. 3. Pp. 49–56.
5. *Ванчин А.Г.* Расчет работы узла воздушного охлаждения газа в условиях компрессорной станции магистрального газопровода [Электронный ресурс] // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2013. Вып. 3. С. 164–179. – Режим доступа: <http://www.ogbus.ru> (дата обращения 29.03.2024).
6. *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. Pp. 46–55.
7. *Данилушкин А.И., Крайнов В.Г., Мигачева Л.А.* Оптимизация стационарного распределения нагрузки аппаратов воздушного охлаждения газа // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2011. № 3 (31). С. 159–164.
8. *Пашкин В.В., Ивашкин О.Н., Шабанов В.А.* Способ управления частотно-регулируемым приводом аппарата воздушного охлаждения газа при двухступенчатом охлаждении // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2019. № 3. С. 177–193 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ogbus.ru> (дата обращения 29.03.2024).
9. *Артюхов И.И., Аришакян И.И., Тарисов Р.Ш., Тримбач А.А., Устинов Е.В.* Ресурсосберегающая технология охлаждения газа на компрессорных станциях // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 1 (54). Вып. 3. С. 25–32.
10. *Абакумов А.М., Кузнецов П.К.* Комбинированное управление электроприводами вентиляторов установок охлаждения газа // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2021. Т. 29, № 3. С. 67–82.
11. *Абакумов А.М., Алимов С.В., Мигачева Л.А., Мосин В.Н.* Оптимизация стационарных режимов работы установок охлаждения газа компрессорных станций магистральных газопроводов // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 3. С. 110–113.
12. *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.
13. *Артюхов И.И., Аришакян И.И., Жабский М.В., Коротков А.В., Погодин 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. технических наук: 05.09.03. Саратов: СГТУ, 2012. 19 с.
16. *Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В.* Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. М.: Академия, 2008. 208 с.
17. *Абакумов А.М., Антропов В.Е., Ведерников А.С., Абакумов О.А.* Энергетическая эффективность установок охлаждения природного газа с частотно-регулируемым приводом вентиляторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2019. № 3 (63). С. 95–104.

Статья поступила в редакцию 08 мая 2024 г.

OPTIMIZATION OF COMBINED ALGORITHMS CONTROL ELECTRIC DRIVES OF INSTALLATIONS NATURAL GAS COOLING

Yu.V. Zubkov, A.M. Abakumov, O.A. Abakumov¹

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

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

Abstract. *The relevance of the problem of reducing energy consumption by electric drives of natural gas cooling units at compressor stations of main gas pipelines is substantiated. The possibility of solving this problem with the help of a combined control system containing two groups of gas air cooling devices is considered: with continuously and discretely controlled speed of electric fan drives. An algorithm for control that is optimal according to the criterion of maximum power savings is obtained, taking into account the peculiarities of temperature distribution along the length of the heat exchanger of the cooling apparatus. It is shown that under conditions of restrictions on control actions, the optimal control algorithm consists of several intervals. Relationships were obtained for calculating the optimal speed of electric fan drives of the first group, the number of switched on electric fan drives of devices of the second group, and power savings at individual control intervals. The influence of the number of devices with continuous fan speed control on the amount of power savings was assessed. The possibility of using a simplified methodology for assessing energy savings based on average indicators of the operating mode of a cooling installation is discussed.*

Keywords: *energy efficiency, natural gas cooling units, variable frequency drive, optimization of control algorithms.*

REFERENCES

1. *Alimov S.V., Prokopec A.O., Kubarov S.V.* Modernizaciya ventilyatorov AVO gaza pri rekonstrukcii KS MG [Modernization of gas air coolers during reconstruction of MG compressor stations] // *Gazovaya promyshlennost.* 2009. № 4. P. 54-56. (In Russian).
2. *Malanichev V.A., Miatov O.L., Tipajlov A.M.* Razrabotka i modernizaciya ventilyatornykh blokov apparatov vozdushnogo ohlazhdeniya [Development and modernization of fan units for air cooling devices] // *Himicheskaya tekhnika*, 2004, № 2. (http://techno-cons.ru/files/23_08_2013_114.pdf) (In Russian).
3. *Shajhudinov A.Z., Lifanov V.A., Malanichev V.A.* Sovremennye AVO gaza – resursy energosberezheniya v gazovoj otrasli [Modern gas air coolers are a resource for energy saving in the gas industry] // *Gazovaya promyshlennost.* 2010. № 9. P. 40-41. (In Russian).
4. *Linde R.* Advantage of pipelining gas at low temperatures // *Pipe Line Industry.* 1984. Vol. 55. No 3. P. 49-56.
5. *Vanchin A.G.* Raschet raboty uzla vozdushnogo ohlazhdeniya gaza v usloviyakh kompressornoj stancii magistral'nogo gazoprovoda [Calculation of the operation of a gas air cooling unit in the conditions of a compressor station of a main gas pipeline] [Elektronnyj resurs // Elektronnyj nauchnyj zhurnal «Neftegazovoe delo». 2013. Vyp. № 3. P. 164-179. Rezhim dostupa: <http://www.ogbus.ru>. Data obrashcheniya 29.03.2024.] (In Russian).
6. *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*

¹ *Yuri V. Zubkov (Dr. Tech. Sci.), Professor.
Alexander M. Abakumov (Dr. Tech. Sci.), Professor.
Oleg A. Abakumov, Postgraduate Student.*

- Efficient Production and Processing ICEPP 2021: Proceedings of ICEPP 2021. Lecture Notes in Civil Engineering. P. 46-55.
7. *Danilushkin A.I., Krajnov V.G., Migacheva L.A.* Optimizaciya stacionarnogo ras-predeleniya nagruzki apparatov vozdušnogo ohlazhdeniya gaza [Optimization of stationary load distribution of gas air coolers] // Vestnik Samarsk. gosud. tekhnich. un-ta. Seriya: Tekhnich. nauki. 2011. № 3 (31). P. 159-164. (In Russian).
 8. *Pashkin V.V., Ivashkin O.N., Shabanov V.A.* Sposob upravleniya chastotno-reguliruemym privodom apparata vozdušnogo ohlazhdeniya gaza pri dvuhstupenchatom ohlazhdenii [Method for controlling a variable-frequency drive of a gas air-cooling apparatus with two-stage cooling] // Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo». 2019. №3. P. 177-193. Rezhim dostupa: <http://ogbus.ru>. Data obrashcheniya 29.03.2024. (In Russian).
 9. *Artyuhov I.I., Arshakyan I.I., Tarisov R.Sh., Trimbach A.A., Ustinov E.V.* Resursosberegayushchaya tekhnologiya ohlazhdeniya gaza na kompressornykh stanciyah [Resource-saving technology for gas cooling at compressor stations] // Vestnik Saratov. gosud. tekhnich. un-ta. 2011. №1(54). Vyp. 3. P. 25-32. (In Russian).
 10. *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 Samarsk. gosud. tekhnich. un-ta. Seriya: Tekhnich. nauki. 2021. T. 29. №3. P. 67-82. (In Russian).
 11. *Abakumov A.M., Alimov S.V., Migacheva L.A., Mosin V.N.* Optimizaciya stacionarnykh rezhimov raboty ustanovok ohlazhdeniya gaza kompressornykh stanciy magistral'nykh gazoprovodov [Optimization of stationary operating modes of gas cooling units at compressor stations of main gas pipelines] // Izvestiya vuzov. Elektromekhanika. 2011. №3. P. 110-113. (In Russian).
 12. *Abakumov A.M., Zubkov Yu.V., Abakumov O.A.* Optimizaciya stacionarnykh 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. V. 67, №1, 2024. P.36-45. (In Russian).
 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 Saratov. gosud. tekhnich. un-ta. 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 gazoturbinnoy kompressornoj stancii v usloviyakh 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 Saratov. gosud. tekhnich. un-ta. 2011. № 4(60). Vyp. 2. P. 165-170. (In Russian).
 15. *Bochkareva I.I.* Obespechenie elektromagnitnoj sovместимости chastotno-reguliruemyykh ustanovok ohlazhdeniya gaza s istochnikami elektrosnabzheniya [Ensuring electromagnetic compatibility of frequency-controlled gas cooling units with power supplies]: Avtoref. dis. ... kand. tekhnicheskikh nauk: 05.09.03. Saratov: SGTU, 2012. 19 p. (In Russian).
 16. *Ilinskij N.F., Moskalenko V.V.* Elektroprivod: energo- i resursosberezhenie [Electric drive: energy and resource saving]. M.: Akademiya, 2008. 208 p. (In Russian).
 17. *Abakumov A.M., Antropov V.E., Vedernikov A.S., Abakumov O.A.* Energeticheskaya effektivnost ustanovok ohlazhdeniya prirodnogo gaza s chastotno-reguliruemym privodom ventilyatorov [Energy efficiency of natural gas cooling units with variable frequency drive fans] // Vestnik Samarsk. gosud. tekhnich. un-ta. Seriya: Tekhnich. nauki. 2019, №3(63). P. 95-104. (In Russian).