

# Электротехника

УДК 621.3

## КОМБИНИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ВЕНТИЛЯТОРОВ УСТАНОВОК ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА

**А.М. Абакумов, П.К. Кузнецов**

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

**Аннотация.** Обсуждается задача управления температурой на выходе установок охлаждения газа компрессорных станций магистральных газопроводов. Для ее решения используется дискретное либо частотное управление электродвигателями вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения газа. Отмечены проблемы электромагнитной совместимости, возникающие в типовых системах электроснабжения установок охлаждения газа при подключении электродвигателей вентиляторов через преобразователи частоты. Рассмотрена комбинированная система управления электродвигателями вентиляторов, в которой электродвигатели разбиты на две группы. Электродвигатели первой группы подключаются к сети напрямую, второй – через частотные преобразователи. За счет уменьшения количества электродвигателей, подключаемых к сети через преобразователи частоты, снижается негативное влияние частотно-регулируемых приводов на показатели качества потребляемой электроэнергии и уменьшаются затраты на проекты модернизации в сравнении с вариантом использования частотного преобразователя для каждого электродвигателя. Проанализированы энергетические характеристики системы комбинированного управления. Получены соотношения, устанавливающие взаимосвязи температурного перепада на установке охлаждения и мощности электродвигателей вентиляторов при различных способах регулирования. Предложен оптимальный по критерию максимума экономии мощности алгоритм управления, предусматривающий взаимосвязанное управление количеством включенных дискретно-регулируемых двигателей и скоростью частотно-регулируемых приводов. Обсуждаются варианты реализации оптимального алгоритма управления. Рассмотрены аналитические выражения для экономии мощности на валу двигателей вентиляторов в комбинированной системе по сравнению с дискретной и методика оценки экономии электроэнергии. Полученные результаты рекомендуется использовать для оценки технико-экономической эффективности проектов модернизации электротехнических комплексов установок охлаждения газа.

**Ключевые слова:** магистральные газопроводы, компрессорные станции, установки охлаждения газа, частотно-регулируемый привод, системы управления.

---

Абакумов Александр Михайлович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроме-  
ханика и автомобильное электрооборудование».

Кузнецов Павел Константинович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электропри-  
вод и промышленная автоматика».

## Введение

На компрессорных станциях магистральных газопроводов природный газ после компримирования охлаждается на установках охлаждения газа (УОГ) до требуемой температуры. Охлаждение газа позволяет повысить пропускную способность трубопровода, обеспечить экономию топливного газа на работу газоперекачивающих агрегатов, снизить температурные деформации трубопровода и повысить его продольную устойчивость. Для компрессорных станций, расположенных в районах вечной мерзлоты, охлаждение газа позволяет предотвратить недопустимые механические воздействия на трубопроводы, связанные с образованием зон протаивания в летний период и их замерзанием в зимний период.

Типовые УОГ содержат 10–20 параллельно включенных аппаратов воздушного охлаждения (АВО), основными элементами которых являются: теплообменник, выполненный из нескольких рядов оребренных труб, и вентиляторы с электроприводом, подающие наружный воздух на теплообменник.

На отечественных компрессорных станциях широко используются АВО типа 2АВГ-75, оснащенные двумя установленными под теплообменником вентиляторами, приводимыми в движение асинхронными двигателями мощностью 37 кВт. Электроснабжение электроприемников УОГ в типовой схеме осуществляется от двухтрансформаторной подстанции с установленной мощностью трансформаторов 630 или 1000 кВА.

При управлении режимами работы установок охлаждения необходимо обеспечить технологические требования по поддержанию требуемой температуры газа на выходе установки, а также энергосберегающие режимы работы УОГ, т. е. установленная мощность электроприводов УОГ, как правило, составляет около 1 МВт и на нужды охлаждения газа на компрессорных станциях с газотурбинным приводом приходится более 60 % расхода электроэнергии, потребляемой на производственные нужды.

В процессе работы УОГ создает температурный перепад (напор), определяемый как разность температур газа на входе  $\theta_{inp}$  и выходе  $\Delta\theta_{out}$  установки:

$$\Delta\theta = \theta_{inp} - \theta_{out}. \quad (1)$$

Задача управления режимом работы установки заключается в поддержании заданной в соответствии с технологическими требованиями температуры  $\theta_r$  на выходе УОГ:

$$\theta_{out} = \theta_r \pm \delta = \theta_{inp} - \Delta\theta \pm \delta, \quad (2)$$

где  $\delta$  – допустимая погрешность поддержания температуры.

Требуемый температурный перепад, который должна создавать установка для выполнения соотношения (2),

$$\Delta\theta_r = \theta_{inp} - \theta_r \pm \delta. \quad (3)$$

Возмущающими воздействиями, вызывающими отклонение температуры на выходе УОГ от заданного значения, являются: изменение расхода газа и его температуры на входе в УОГ, изменение температуры и влажности атмосферного воздуха и т. д.

Для решения задачи стабилизации температуры газа на выходе установки управляют температурным перепадом на УОГ за счет изменения режимов работы приводов вентиляторов АВО. На большинстве эксплуатируемых установок

используется дискретное управление – включение/выключение электродвигателей вентиляторов [1–3].

В последние десятилетия получает применение управление скоростью вентиляторов, реализуемое с помощью частотно-регулируемого привода (ЧРП) и обеспечивающее существенное повышение энергетической эффективности установок охлаждения, а также снижение динамических нагрузок на питающую сеть и кинематическую часть привода, возникающих в процессе пуска АД прямым включением в сеть [4–12].

В то же время оснащение всех двигателей УОГ преобразователями частоты (ПЧ) приводит в типовых схемах электроснабжения газотурбинных КС к существенному искажению синусоидальности формы потребляемого тока и возникновению проблемы электромагнитной совместимости ПЧ со смежными электроприемниками [13–15].

Для обеспечения электромагнитной совместимости ЧРП приходится дополнительно оснащать входными и выходными фильтрами, что увеличивает затраты на реализацию проектов модернизации. Наряду с установкой фильтров острота проблемы электромагнитной совместимости может быть снижена использованием комбинированного управления. В комбинированной системе управления часть двигателей вентиляторов подключается к ПЧ, а скорость второй части двигателей регулируется дискретно, тем самым уменьшается потребление несинусоидального тока от источника питания.

В связи с изложенным представляет интерес анализ энергетических показателей УОГ при совместном использовании дискретного и частотного регулирования в комбинированной системе.

### **1. Экономия мощности при частотном и комбинированном управлении**

Введем допущения о равномерности распределения потоков газа по параллельно включенным АВО и идентичности тепловых характеристик аппаратов и оценим мощность на валу двигателей вентиляторов УОГ при дискретном, частотном и комбинированном способах управления в стационарных режимах.

В случае работы всех вентиляторов с номинальной частотой вращения на УОГ в определенных условиях создается некоторый номинальный температурный перепад  $\Delta\theta_{nom}$ , который далее принят за базовый для перехода к относительным величинам (о. е.).

#### ***Дискретное регулирование***

При дискретном регулировании с учетом принятых допущений температурный перепад на УОГ, как следует из анализа уравнения теплового баланса, пропорционален количеству  $d_d$  включенных двигателей [2, 6, 7, 10] :

$$\Delta\theta = \Delta\theta_d = \Delta\theta_{nom} \frac{d_d}{N} = \Delta\theta_{nom} \beta_d, 0 \leq \beta_d \leq 1, d_d = \overline{0, 1, 2, \dots, N}, \quad (4)$$

где  $\beta_d = d_d/N$  – относительное число включенных двигателей вентиляторов;  
 $N$  – общее количество двигателей вентиляторов.

Представим  $\Delta\theta_d$  по (4) и требуемый температурный перепад в относительных единицах:

$$\Delta\theta^* = \Delta\theta_d^* = \Delta\theta_d / \Delta\theta_{nom} = \beta_d; \Delta\theta_r^* = \Delta\theta_r / \Delta\theta_{nom}; \\ 0 \leq \Delta\theta_r^* \leq 1; \theta_{nom}^* = 1. \quad (5)$$

Относительный требуемый перепад  $\Delta\theta_r^*$  целесообразно использовать в аналитических исследованиях в качестве обобщенной переменной, учитывающей как тепловые характеристики АВО, так и технологические требования.

Мощность дискретно-регулируемых приводов вентиляторов пропорциональна количеству  $d_d$  включенных двигателей:

$$P_d = P_{nom} d_d,$$

где  $P_{nom}$  – номинальная мощность двигателя вентилятора.

Примем суммарную мощность двигателей вентиляторов за базовую величину:

$$P_\Sigma = P_{nom} N.$$

Учтем выражение (5) и требование  $\Delta\theta^* = \Delta\theta_r^*$ , выразим мощность  $P_d$  в относительных единицах и установим зависимость мощности двигателей вентиляторов от требуемого температурного перепада:

$$P_d^*(\Delta\theta_r^*) = \frac{P_d}{P_\Sigma} = \frac{d_d}{N} = \beta_d = \Delta\theta_r^*, 0 \leq \Delta\theta_r^* \leq 1. \quad (6)$$

При достаточно большом количестве вентиляторов, что имеет место на практике, можно без существенной погрешности пренебречь дискретностью изменения числа вентиляторов и принять зависимость  $P_d^*(\Delta\theta^*)$  линейной. Соответствующий график (прямая 1) показан на рис. 1.

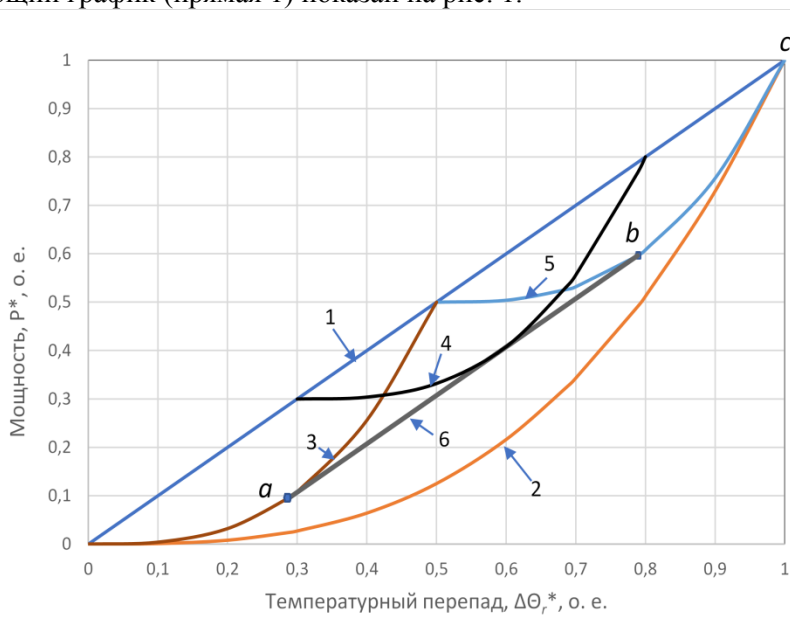


Рис. 1. Графики зависимости мощности  $P^*$  двигателей вентиляторов от требуемого температурного перепада  $\Delta\theta_r^*$ , о. е.: 1 – дискретное управление; 2 – частотное управление; 3–5 – комбинированное управление

### **Частотное управление**

При частотном управлении всем  $N$  вентиляторам задается одинаковая скорость, а температурный перепад линейно зависит от относительной скорости  $n^*$  вентиляторов [4–7]:

$$\Delta\Theta = \Delta\Theta_f = \Delta\Theta_{nom}n^*; n^* = \frac{n}{n_{nom}},$$

где  $n, n_{nom}$  – текущая и номинальная скорость соответственно.

В относительных единицах

$$\Delta\Theta^* = \Delta\Theta_f^* = n^*. \quad (7)$$

Мощность на валу частотно-регулируемых двигателей вентиляторов зависит от куба относительной скорости [7, 10–12]:

$$P_f = P_{nom}N(n^*)^3.$$

Или в относительных единицах:

$$P_f^* = \frac{P_f}{P_\Sigma} = (n^*)^3. \quad (8)$$

Приняв во внимание требование  $\Delta\Theta_f^* = \Delta\Theta_r^*$  и формулы (7), (8), зависимость мощности ЧРП вентиляторов от требуемого температурного перепада в относительных единицах можно представить в виде:

$$P_f^*(\Delta\Theta_r^*) = \frac{P_f}{P_\Sigma} = (n^*)^3 = (\Delta\Theta_r^*)^3. \quad (9)$$

График зависимости  $P_f^*(\Delta\Theta_r^*)$  приведен на рис. 1 (кривая 2).

### **Комбинированное управление**

В этом случае одна часть вентиляторов установки приводится в движение ЧРП и регулирование осуществляется одновременным изменением частоты вращения вентиляторов. Вторая часть вентиляторов приводится в движение дискретно-регулируемыми приводами.

Обозначим относительное количество вентиляторов (долю), приводимых в движение ЧРП, –  $\alpha$ , долю дискретно-регулируемых приводов –  $\beta_0$ :

$$\alpha = d_f/N, \beta_0 = d_{d0}/N, \alpha < 1, \beta_0 < 1, \alpha + \beta_0 = 1, \quad (10)$$

где  $d_f, d_{d0}$  – количество частотно- и дискретно-регулируемых двигателей вентиляторов соответственно.

Как показал анализ, для достижения максимальной энергетической эффективности при комбинированном регулировании следует полностью использовать вентиляторы с ЧРП и варьировать количество  $d_{dc}$  включенных дискретно-регулируемых двигателей:

$$\alpha = const, n^* = var, \beta_c = d_{dc}/N = var, \beta_c \leq \beta_0.$$

Общий температурный перепад на УОГ, как показал анализ уравнения теплового баланса, можно представить в виде двух составляющих. Одна из них  $\Delta\Theta_{dc}$  создается вентиляторами с дискретно-регулируемыми приводами, вторая  $\Delta\Theta_{fc}$  – вентиляторами с ЧРП:

$$\Delta\Theta = \Delta\Theta_{dc} + \Delta\Theta_{fc}.$$

Выразим температурные перепады в относительных единицах:

$$\Delta\Theta^* = \Delta\Theta_{dc}^* + \Delta\Theta_{fc}^*, \quad (11)$$

где

$$\Delta\theta_{dc}^* = \Delta\theta_{dc} / \Delta\theta_{nom}; \Delta\theta_{fc}^* = \Delta\theta_{fc} / \Delta\theta_{nom}.$$

С учетом (5) относительный температурный перепад, создаваемый вентиляторами с дискретно-регулируемыми двигателями,

$$\Delta\theta_{dc}^* = \beta_c.$$

Температурный перепад, создаваемый вентиляторами с ЧРП, определяется их количеством  $d_f$  и согласно (7) относительной частотой вращения:

$$\Delta\theta_{fc} = \Delta\theta_{nom} \frac{d_f}{N} n^* = \Delta\theta_{nom} \alpha n^*.$$

В относительных единицах

$$\Delta\theta_{fc}^* = \alpha n^*. \quad (12)$$

На основании выражения (12) относительная частота вращения ЧРП вентиляторов, соответствующая температурному перепаду  $\Delta\theta_{fc}^*$ ,

$$n^* = \frac{1}{\alpha} \Delta\theta_{fc}^*.$$

Или, с учетом соотношения (11),

$$n^* = \frac{1}{\alpha} (\Delta\theta^* - \beta_c). \quad (13)$$

Мощность дискретно-регулируемых приводов вентиляторов согласно выражению (6) в относительных единицах

$$P_d^* = \frac{P_c}{P_\Sigma} = \frac{d_{dc}}{N} = \beta_c = \Delta\theta_{dc}^*. \quad (14)$$

Мощность на валу ЧРП вентиляторов при комбинированном регулировании зависит от их числа и куба относительной частоты вращения:

$$P_{fc} = P_{nom} d_{fc} (n^*)^3.$$

Приняв во внимание выражение (13) для относительной частоты вращения, мощность на валу ЧРП вентиляторов в относительных единицах представим в виде

$$P_{fc}^* = \frac{P_{fc}}{P_\Sigma} = \alpha (n^*)^3 = \frac{1}{\alpha^2} (\Delta\theta^* - \beta_c)^3. \quad (15)$$

Мощность на валу двигателей вентиляторов при комбинированном управлении складывается из мощности на валу  $P_{dc}^*$  (14) дискретно-регулируемых приводов и мощности на валу  $P_{fc}^*$  (15) двигателей частотно-регулируемых приводов:

$$P_c^* = P_{dc}^* + P_{fc}^* = \beta_c + \frac{1}{\alpha^2} (\Delta\theta^* - \beta_c)^3.$$

С учетом технологического требования:  $\Delta\theta^* = \Delta\theta_r^*$  мощность при комбинированном управлении

$$P_c^*(\Delta\theta_r^*, \beta_c) = \beta_c + \frac{1}{\alpha^2} (\Delta\theta_r^* - \beta_c)^3. \quad (16)$$

Графики, отражающие зависимость мощности на валу вентиляторов  $P_c^*$  от требуемого температурного перепада для  $\alpha = 0,5$ , приведены на рис. 1: кривая 3 –  $\beta_c = 0$ ; кривая 4 –  $\beta_c = 0,25$ ; кривая 3 –  $\beta_c = 0,5$ .

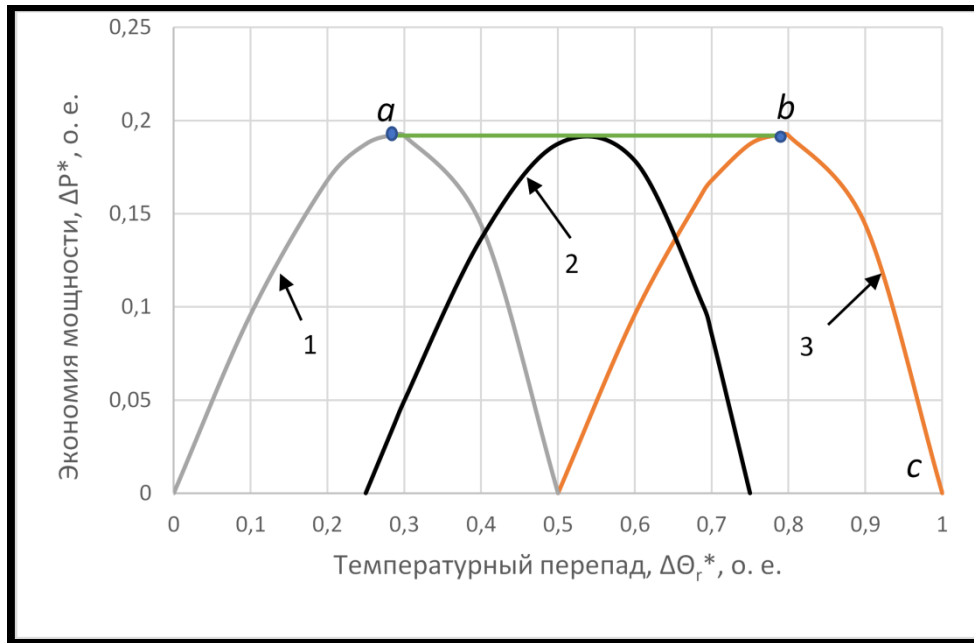


Рис. 2. Графики экономии мощности для  $\alpha = 0,5$  при комбинированном управлении

На основе выражений (6), (16) оценим экономию мощности на валу двигателей вентиляторов при использовании комбинированного управления вместо дискретного:

$$\Delta P_{d-c}^*(\Delta\Theta_r^*, \beta_c) = P_d^*(\Delta\Theta_r^*) - P_c^*(\Delta\Theta_r^*, \beta_c) = \Delta\Theta_r^* - \left[ \beta_c + \frac{1}{\alpha^2} (\Delta\Theta_r^* - \beta_c)^3 \right]. \quad (17)$$

На рис. 2 показаны графики экономии мощности для  $\alpha = 0,5$  и различных значений относительного числа включенных дискретно-регулируемых двигателей:  $\beta = 0$  – кривая 1;  $\beta = 0,25$  – кривая 2;  $\beta = 0,5$  – кривая 3.

## 2. Оптимальный алгоритм комбинированного управления

Экономия мощности при фиксированном значении  $\alpha$ , как следует из выражения (17), зависит от требуемого температурного перепада  $\Delta\Theta_r^*$  и числа  $\beta_c$  включенных дискретно-регулируемых двигателей вентиляторов. Примем экономию мощности  $\Delta P_{d-c}^*(\Delta\Theta_r^*, \beta_c)$  в качестве критерия оптимизации и сформулируем задачу оптимизации стационарных режимов комбинированного управления в виде: найти оптимальное значение  $\beta_{opt}$  включенных дискретно-регулируемых двигателей вентиляторов, доставляющее максимум критерию оптимизации  $\Delta P_{d-c}^*$  в условиях ограничений (10) и требований технологического режима  $\Delta\Theta^* = \Delta\Theta_r^*$ :

$$\Delta P_{opt}^*(\Delta\Theta_r^*, \beta_{opt}) = \min \Delta P_{d-c}^*(\Delta\Theta_r^*, \beta_c).$$

Экономия мощности при оптимальном комбинированном управлении

$$\Delta P_{opt}^*(\Delta\theta_r^*, \beta_{opt}) = \Delta\theta_r^* - \left[ \beta_{opt} + \frac{1}{\alpha^2} (\Delta\theta_r^* - \beta_{opt})^3 \right]. \quad (18)$$

Исследование функции (18) показало, что она имеет три характерных интервала.

На первом интервале изменения требуемого температурного перепада

$$0 \leq \Delta\theta_r^* < \frac{\alpha}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

действует ограничение  $\beta_c \geq 0$  и оптимальное число включенных дискретно-регулируемых двигателей  $\beta_{opt} = 0$ . Соответственно, регулирование температурного перепада на этом интервале следует вести только за счет изменения скорости частотно-регулируемых двигателей вентиляторов. На графике мощности  $P_c^*$  (рис. 1) и экономии мощности (рис. 2) это участки 0–а. Экономия мощности на этом интервале определяется соотношением (18), а оптимальная частота вращения вентиляторов с учетом формулы (13)

$$n_{opt}^* = \frac{1}{\alpha} \Delta\theta_r^*.$$

Максимум функции (18) достигается на втором интервале изменения требуемого значения температурного перепада

$$\frac{\alpha}{\sqrt{3}} \leq \Delta\theta_r^* \leq \beta_0 + \frac{\alpha}{\sqrt{3}}. \quad (20)$$

Оптимальное относительное число включенных дискретно-регулируемых двигателей на этом интервале

$$\beta_{opt} = \Delta\theta_r^* - \frac{\alpha}{\sqrt{3}}. \quad (21)$$

Выражение для экономии мощности (18) на втором интервале изменения  $\Delta\theta_r^*$  при оптимальном комбинированном управлении после преобразований приведено к виду

$$\Delta P_{opt}^* = \frac{2\alpha}{3\sqrt{3}}. \quad (22)$$

Соотношение для оптимального значения относительной частоты вращения частотно-регулируемых двигателей вентиляторов получено подстановкой в формулу (13)  $\beta_c = \beta_{opt}$  и  $\Delta\theta^* = \Delta\theta_r^*$  и приведено к виду

$$n_{opt}^* = \frac{1}{\sqrt{3}}. \quad (23)$$

Таким образом, на втором интервале изменения  $\Delta\theta_r^*$  при фиксированном значении относительного числа  $\alpha$  частотно-регулируемых двигателей вентиляторов экономия мощности остается неизменной.

График мощности  $P_c^*$  показан на рис. 1 (кривая 6). Рассматриваемому интервалу изменения  $\Delta\theta_r^*$  соответствует участок графика а–b. Аналогичный участок показан на графике экономии мощности (рис. 2).

На третьем интервале изменения  $\Delta\theta_r^*$

$$\beta_0 + \frac{\alpha}{\sqrt{3}} < \Delta\theta_r^* \leq 1 \quad (24)$$

вступает в действие ограничение на максимальное число включенных дискретно-регулируемых двигателей. Все они должны быть включены:  $\beta_{opt} = \beta_0$ , и регу-



лирование температурного перепада осуществляется ЧРП.

На графиках мощности (рис. 1) и экономии мощности (рис. 2) этому интервалу соответствуют участки  $b-c$ . Экономия мощности определяется соотношением (18), а оптимальная частота вращения вентиляторов с учетом формулы (13)

$$n_{opt}^* = \frac{1}{\alpha} (\Delta\theta_r^* - \beta_0).$$

Экономия мощности в оптимальной комбинированной системе во всем допустимом интервале изменения требуемого температурного перепада на рис. 2 показывает кривая  $0-a-b-c$ .

Частотное управление может рассматриваться как частный случай комбинированного, когда  $\alpha = 1$ . Анализ выражения (17) показал, что максимальное значение экономии мощности в случае частотного управления достигается при  $\Delta\theta_r^* \approx 0,6$  и составляет

$$\Delta P_{fmax}^* = \frac{2}{3\sqrt{3}} \approx 0,38.$$

Отношение экономии мощности по выражению (22) при комбинированном управлении на втором интервале изменения  $\Delta\theta_r^*$  к максимальной экономии мощности при частотном управлении составляет

$$\frac{\Delta P_{opt}^*}{\Delta P_{fmax}^*} = \alpha.$$

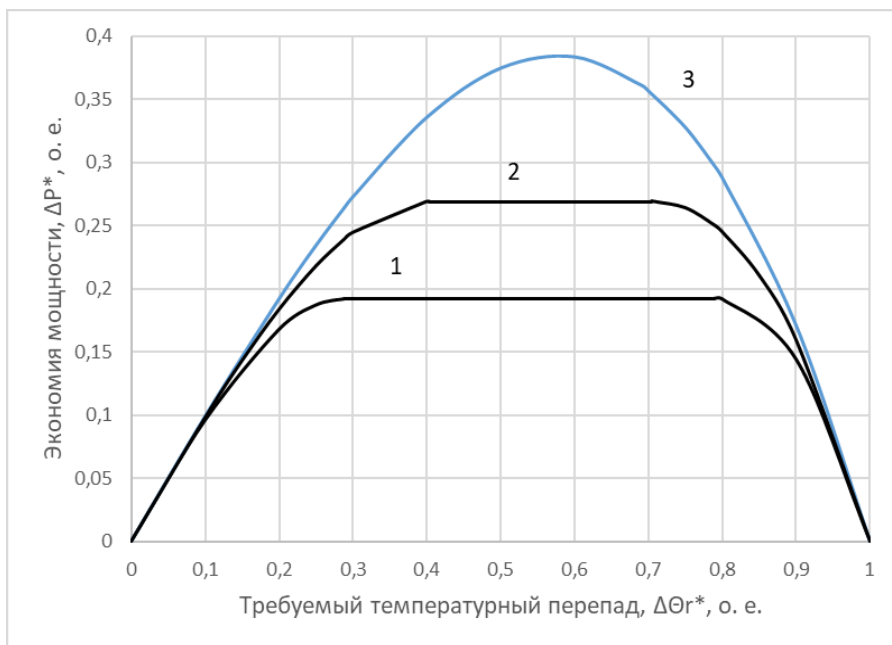


Рис. 3. Графики экономии мощности при оптимальном комбинированном и частотном управлении

Таким образом, частотное управление обеспечивает большую в  $1/\alpha$  экономию мощности по сравнению комбинированным. Однако это имеет место только в случае работы системы со значением требуемого температурного перепада

$\Delta\theta_r^* \approx 0,6$ . В реальных условиях, когда требуемый температурный перепад  $\Delta\theta_r^*$  изменяется, значения экономии мощности будут отличаться менее существенно.

Графики зависимости экономии мощности от требуемого температурного перепада при оптимальном комбинированном управлении для значений  $\alpha = 0,5$  и  $\alpha = 0,7$  представлены на рис. 3 (кривые 1 и 2 соответственно). Там же показан график экономии мощности при частотном управлении (кривая 3).

Как следует из приведенных графиков, в случае оптимального комбинированного управления на участках ограничений по числу дискретно включаемых двигателей графики экономии мощности несущественно отличаются от графика, полученного для частотного управления. На втором интервале изменения требуемого температурного перепада экономия мощности в комбинированной системе остается постоянной, а ее значение снижается пропорционально  $\alpha$  по сравнению с максимумом экономии при частотном управлении.

Например, в типовой УОГ с 12 АВО типа АВГ–75, содержащей  $N = 24$  двигателя номинальной мощности  $P_{nom} = 37$  кВт, в оптимальной комбинированной системе на втором интервале согласно выражению (22) будет достигаться экономия мощности

$$\Delta P = \Delta P_{opt}^* N P_{nom} = \frac{2\alpha}{3\sqrt{3}} N P_{nom} = 163 \text{ кВт.}$$

### 3. Реализация оптимального алгоритма комбинированного управления

Остановимся на вопросе построения системы оптимального комбинированного управления. Такую систему целесообразно выполнять в виде двух подсистем: дискретного и частотного управления.

Возможна реализация полученного оптимального алгоритма с использованием для дискретной подсистемы принципа управления по разомкнутому циклу.

В этом случае первая подсистема должна обеспечивать вычисление оптимального относительного значения числа включенных дискретно-регулируемых двигателей вентиляторов в соответствии с выражением (21) и ограничениями (10). Число включенных двигателей с учетом дискретности задается равным

$$d_{dc} = \left[ d'_{dc} \right],$$

где  $[d_{dc}]$  – наименьшее целое, большее или равное  $d'_{dc}$ , определяемое из соотношения

$$d'_{dc} = \beta_{opt} N.$$

Значение  $\Delta\theta_{nom}$ , необходимое для расчетов  $\beta_{opt}$ , может быть определено по результатам измерений температуры на входе и выходе АВО с дискретным регулированием скорости вентиляторов.

Вторую подсистему целесообразно выполнять в виде САУ, замкнутой по температуре газа на выходе УОГ, что обеспечит стабилизацию температуры на заданном уровне и поддержание оптимального значения частоты вращения вентиляторов, оснащенных ЧРП.

Более предпочтительным по сравнению с рассмотренным представляется вариант реализации алгоритма управления электроприводами в комбинированной системе с использованием информации о скорости частотно-регулируемых приводов вентиляторов.

Как следует из вышеизложенного, относительная скорость ЧРП на первом интервале оптимального управления меньше оптимальной  $n_{opt}^*$  по выражению (23):  $n^* \leq n_{opt}^*$ , а относительное число включенных дискретно-регулируемых двигателей  $\beta_{opt} = 0$ .

На втором интервале должно поддерживаться оптимальное значение скорости  $n_{opt}^*$ .

На третьем интервале  $n^* \geq n_{opt}^*$ , а относительное число включенных дискретно-регулируемых двигателей  $\beta_{opt} = \beta_0$ .

С учетом этих особенностей оптимальный алгоритм управления дискретно-регулируемыми двигателями может быть изложен в следующем виде.

Если текущее значение скорости ЧРП в замкнутой по температуре подсистеме частотного регулирования превышает оптимальное значение, дискретная подсистема формирует сигнал на подключение дополнительного двигателя; в противоположной ситуации вырабатывается сигнал на отключение двигателя. При выходе системы на ограничение  $\beta_{opt} = 0$  или  $\beta_{opt} = \beta_0$  число дискретно-регулируемых двигателей должно оставаться неизменным.

В такой системе будет исключена необходимость расчета  $\beta_{opt}$ , обеспечена стабилизация заданного значения температуры на выходе УОГ и автоматическое изменение числа включенных дискретно-регулируемых двигателей.

Учитывая инерционность объекта управления, следует в САУ задавать зону допустимых отклонений текущей скорости от оптимального значения (зону нечувствительности) и выполнять переключения с выдержкой времени, достаточной для выхода системы на стационарный режим работы.

#### **4. Энергетическая эффективность комбинированного и частотного управления**

Рассмотрим энергетическую эффективность использования ЧРП.

Она должна оцениваться сопоставлением затрат на реализацию проекта модернизации с сокращением эксплуатационных расходов, достигаемым прежде всего за счет снижения стоимости потребленной электроэнергии [16, 17].

Необходимые инвестиции в проект определяются стоимостью частотных преобразователей, затратами на их монтаж и наладку, а также при необходимости стоимостью дополнительного по условиям электромагнитной совместимости оборудования.

Стоимость сэкономленной за год электроэнергии при переходе от дискретного регулирования к частотному или комбинированному определяется экономией электроэнергии  $\Delta W_{\Sigma}$  и тарифом на электроэнергию  $c_e$  или, при наличии электростанции собственных нужд, себестоимостью вырабатываемой электроэнергии:

$$C_e = \Delta W_{\Sigma} c_e.$$

Экономия электроэнергии в общем случае находится интегрированием по времени экономии мощности, которая при частотном и комбинированном управлении, в отличие от дискретного, нелинейно зависит от относительного требуемого температурного перепада  $\Delta \theta_r^*$ .

Значение  $\Delta \theta_r^*$  изменяется на суточном и годовом интервалах времени, что обусловлено в основном суточными и сезонными вариациями температуры наружного воздуха. В этих условиях для детального расчета экономии электро-

энергии необходима информация о текущих значениях переменных, определяющих требуемое значение температурного перепада [7].

Для упрощения задачи оценки экономии электроэнергии целесообразно использовать широко применяемые в энергетике так называемые упорядоченные диаграммы, отражающие длительность работы установок и комплексов с неизменной требуемой производительностью за время цикла. За время цикла, как правило, принимается число часов работы установки в году.

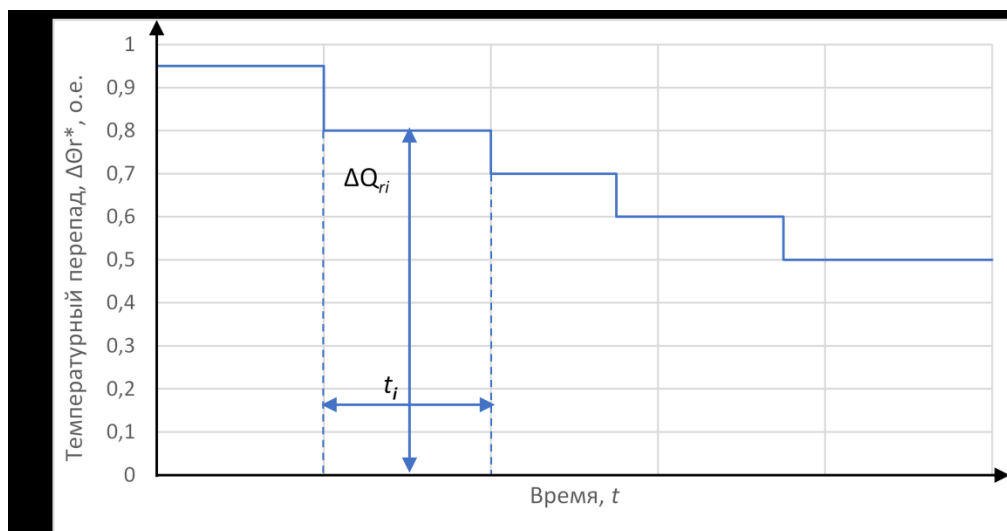


Рис. 4. Упорядоченная диаграмма требуемого температурного перепада

Применительно к рассматриваемой задаче упорядоченная диаграмма должна отражать длительность  $t_i$  работы установки с различными требуемыми постоянными значениями  $\Delta\Theta_{ri}^*$  за время цикла. Пример диаграммы приведен на рис. 4.

Подобные диаграммы могут быть получены из следующих соображений. В УОГ с дискретным регулированием согласно (6) относительная мощность на валу электродвигателей вентиляторов равна требуемому относительному перепаду температуры. Учитывая это, упорядоченные диаграммы, сформированные для мощности двигателей, можно рассматривать как упорядоченные диаграммы требуемого температурного перепада.

Информация для построения упорядоченных диаграмм мощности электроприводов УОГ может быть получена для действующих конкретных установок с дискретным регулированием по данным автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии или сведениям о длительности работы определенного количества двигателей установки.

Экономия электроэнергии при комбинированном управлении на каждом интервале постоянства требуемого температурного перепада определяется соотношением

$$\Delta W_{ic} = \Delta P_{iopt}^* P_{\Sigma} t_i.$$

Экономия электроэнергии за год находится суммированием экономии на отдельных интервалах:

$$\Delta W_{\Sigma c} = \sum_{i=1}^l \Delta W_{ic},$$

где  $l$  – количество интервалов упорядоченной диаграммы.

Простой срок окупаемости проекта [16, 17] использования комбинированного управления без учета дополнительных преимуществ использования ЧРП определяется выражением

$$T_c = \frac{k\alpha NC_f}{\Delta W_{\Sigma c} c_e},$$

где  $k$  – повышающий коэффициент, учитывающий затраты на монтаж и наладку ЧРП;

$C_f$  – стоимость преобразователя частоты.

Для расчета срока окупаемости системы частотного управления следует в последнем выражении принять  $\alpha = 1$ , использовать соответствующее значение экономии электроэнергии и ввести дополнительный повышающий коэффициент, учитывающий дополнительные затраты на мероприятия и оборудование, обеспечивающие электромагнитную совместимость.

Срок окупаемости систем оптимального комбинированного управления оказывается меньше, чем для частотных систем. Однако после окончания срока окупаемости прибыль от частотной системы выше за счет больших значений экономии электроэнергии.

Рассмотренная методика позволяет дать количественные оценки показателей энергетической эффективности конкретных систем частотного и комбинированного управления, работающих в определенных режимах.

## Выводы

Задача управления температурой на выходе установки охлаждения газа может решаться использованием дискретного, частотного и комбинированного способов управления приводными двигателями вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения газа.

Комбинированная система управления по сравнению с дискретной обеспечивает экономию мощности и электроэнергии, потребляемой на нужды охлаждения.

Оптимальный по критерию максимума экономии электроэнергии алгоритм комбинированного управления содержит интервал изменения требуемого температурного перепада, на котором осуществляется взаимосвязанное управление количеством включенных дискретно-регулируемых двигателей и скоростью ЧРП. Величина экономии мощности на этом интервале остается неизменной. На двух интервалах особого управления действуют ограничения на число включенных дискретно-регулируемых двигателей, и регулирование температурного перепада осуществляется только изменением скорости ЧРП.

Систему комбинированного управления, реализующую оптимальный алгоритм, целесообразно выполнять в виде замкнутой по температуре газа на выходе УОГ подсистемы частотного управления и взаимосвязанной с ней подсистемы дискретного управления.

Комбинированное управление по сравнению с частотным дает меньшую экономию мощности и электроэнергии. В то же время в комбинированной си-

стеме уменьшается количество ЧРП и требуемые затраты на реализацию проекта. Кроме того, могут быть уменьшены затраты на дополнительное оборудование, необходимое для решения проблем электромагнитной совместимости, возникающих в случае, когда мощность группы ЧРП соизмерима с мощностью питающего трансформатора.

Указанные факторы должны учитываться при технико-экономическом обосновании проектов модернизации электротехнических комплексов УОГ.

Полученные аналитические выражения экономии мощности и электроэнергии в оптимальной комбинированной системе управления могут быть использованы для сравнительной оценки энергетической эффективности альтернативных вариантов проектов систем регулирования температурных режимов УОГ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Крайнов В.Г.* Оптимизация режимов работы электроприводов установок охлаждения газа при транспортировке: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 24 с.
2. *Ванчин А.Г.* Расчет работы узла воздушного охлаждения газа в условиях компрессорной станции магистрального газопровода // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. – 2013. – № 3. – С. 164–179 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ogbus.ru>
3. *Шахмудинов А.З., Лифанов В.А., Маланичев В.А.* Современные АВО газа – ресурс энергосбережения в газовой отрасли // Газовая промышленность. – 2010. – № 9. – С. 40–41.
4. *Абакумов А.М., Степашкин И.П.* Исследование систем автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения природного газа // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2018. – № 2 (58). – С. 92–101.
5. *Абакумов А.М., Мигачев А.В., Степашкин И.П.* Исследование системы управления аппаратом воздушного охлаждения природного газа // Известия вузов. Электромеханика. – 2016. – № 6. – С. 130–134.
6. *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.
7. *Абакумов А.М., Антропов В.Е., Абакумов О.А.* Энергетическая эффективность установок охлаждения природного газа с частотно-регулируемым приводом вентиляторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2019. – № 3. – С. 95–104.
8. *Abakumov A.M., Stepashkin I.P.* The Adaptive Automatic Control System of Natural Gas Air-Cooling Unit // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018 2019. С. 8602811.
9. *Linde R.* Advantage of pipelining gas at low temperatures // Pipe Line Industry. 1984. Vol. 55. No 3. P. 49–56.
10. *Артюхов И.И., Аршакая И.И., Крылов И.П.* Автоматическое управление аппаратами воздушного охлаждения на объектах магистрального транспорта газа // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – № 1. – С. 33–36.
11. *Артюхов И.И., Аршакая 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.
12. *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.
13. *Артюхов И.И., Аршакая 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 электропитания 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: 05.09.03. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2012. – 19 с.
16. Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. – М.: Академия, 2008. – 208 с. ISBN 978-7695-2849-1.
17. Инструкция по расчету экономической эффективности применения частотно-регулируемого электропривода. – М.: АО ВНИИЭ, МЭИ, 1997. – 13 с.

*Статья поступила в редакцию 7 мая 2021 г.*

## COMBINED CONTROL OF FANS OF GAS COOLING UNITS ELECTRIC DRIVES

***A.M. Abakumov, P.K. Kuznetsov***

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

**Abstract.** *The problem of the temperature control at the outlet of gas cooling units of compressor stations of main gas pipelines is discussed. To solve the problem, a discrete or frequency control of electric motors of fans of gas air cooling devices is used. The problems of electromagnetic compatibility that arise in typical power supply systems of gas cooling installations when connecting electric motors of fans through frequency converters are noted. A combined fan motor control system is considered, in which the electric motors are divided into two groups. The electric motors of the first group are connected to the network directly, the second – through frequency converters. By reducing the number of electric motors connected to the network through frequency converters, the negative impact of frequency-controlled drives on the quality of electricity is reduced and the costs of modernization projects are reduced in comparison with the option of the variant using a frequency converter for each electric motor. The energy characteristics of the combined control system are analyzed. The relations that establish the relationship between the temperature difference at the cooling unit and the power of the fan motors for various control methods are obtained. The optimal control algorithm according to the criterion of maximum power saving is proposed, which provides for the interconnected control of the number of discrete-controlled motors and the speed of frequency-controlled drives. The variants of the implementation of the optimal control algorithm are discussed. Analytical expressions for power saving on the fan motor shaft in a combined system compared with a discrete one and a method for estimating energy savings are considered. The obtained results are recommended to be used to assess the technical and economic efficiency of projects for the modernization of electrical complexes of gas cooling units.*

**Keywords:** *main gas pipelines, compressor stations, gas cooling units, frequency-controlled drive, control systems.*

### REFERENCES

1. Krainov V.G. Optimization of operating modes of electric drives of gas cooling installations during transportation: Author's abstract. dis. ... Cand. tech. Sciences: 05.09.03. Samar. state tech un-t, Samara, 2014. 24 p.

---

*Alexander M. Abakumov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Pavel K. Kuznetsov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

2. *Vanchin A.G.* Calculation of the operation of the gas air cooling unit in the conditions of the compressor station of the main gas pipeline // Electronic scientific journal "Oil and Gas Business". 2013. Issue. No. 3. Pp. 164–179. <http://www.ogbus.ru>
3. *Shaikhutdinov A.Z., Lifanov V.A., Malanichev V.A.* Modern AVO gas – a resource of energy saving in the gas industry // Gas industry. 2010. No. 9. Pp. 40–41.
4. *Abakumov A.M., Stepashkin I.P.* Investigation of automatic control systems for air cooling devices for natural gas // Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Technical Sciences". No. 2 (58). 2018. Pp. 92–101.
5. *Abakumov A.M., Migachev A.V., Stepashkin I.P.* Investigation of the control system for a natural gas air cooling apparatus // Izvestiya vuzov. Electromechanics. 2016. No. 6. Pp. 130–134.
6. *Abakumov A.M., Alimov S.V., Migacheva L.A., Mosin V.N.* Optimization of stationary operating modes of gas cooling units of compressor stations of main gas pipelines // Izvestiya vuzov. Electromechanics. 2011. No. 3. Pp. 110–113.
7. *Abakumov A.M., Antropov V.E., Abakumov O.A.* Energy efficiency of natural gas cooling installations with a frequency-controlled fan drive // Vestnik SamSTU, Series "Technical Sciences". 2019. No. 3. Pp. 95–104.
8. *Abakumov A.M., Stepashkin I.P.* The Adaptive Automatic Control System of Natural Gas Air-Cooling Unit // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018 2019. Pp. 8602811.
9. *Linde R.* Advantage of pipelining gas at low temperatures // Pipe Line Industry. 1984. Vol. 55. No. 3. Pp. 49–56.
10. *Artyukhov I.I., Arshakyan I.I., Krylov I.P.* Automatic control of air cooling devices at gas transmission facilities // Mechatronics, automation, control. 2003. No. 1. Pp. 33–36.
11. *Artyukhov I.I., Arshakyan I.I., Tarisov R.Sh., Trimbach A.A., Ustinov E.V.* Resource-saving technology for gas cooling at compressor stations // Bulletin of the Saratov State. tech. un-that. 2011. No. 1 (54). Issue 3. Pp. 25–32.
12. *Kumar B.K., Vygoniuk P.I.* Automatic control system for air cooling devices for raw natural gas // Bulletin of the Kazakh National Technical University. K.I. Satnaev. 2011. No. 1 (83). Pp. 67–71.
13. *Artyukhov I.I., Arshakyan I.I., Zhabsky M.V., Korotkov A.V., Pogodin N.V., Trimbach A.A.* Some aspects of using a variable frequency drive in compressed gas air cooling systems // Bulletin of the Saratov State Technical University. 2006. No. 1 (100). Issue 1. Pp. 20–29.
14. *Artyukhov I.I., Bochkareva I.I., Trimbach A.A.* The quality of electricity in the power supply system of a gas turbine compressor station in the conditions of equipping gas cooling units with a frequency-controlled electric drive of fans // Bulletin of the Saratov State Technical University. 2011. No. 4 (60). Issue 2. Pp. 165–170.
15. *Bochkareva I.I.* Ensuring electromagnetic compatibility of frequency-controlled gas cooling units with power supply sources: Author's abstract. dis. ... Cand. technical sciences: 05.09.03. Saratov: Sarat. state gehn. un-t, 2012. 19 p.
16. *Ilyinsky N.F., Moskalenko V.V.* Electric drive: energy and resource saving. M.: Academy, 2008. 208 p. ISBN 978-7695-2849-1.
17. Instructions for calculating the economic efficiency of using a variable frequency drive. M.: AO VNIIE, MEI. 1997. 13 p.