

А.М. АБАКУМОВ, В.Н. ОВСЯННИКОВ

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД
В СИСТЕМАХ МАГИСТРАЛЬНОГО
ТРАНСПОРТА ПРИРОДНОГО ГАЗА**

Учебное пособие

**Самара
Самарский государственный технический университет
2024**



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

А.М. АБАКУМОВ, В.Н. ОВСЯННИКОВ

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД В СИСТЕМАХ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРАНСПОРТА ПРИРОДНОГО ГАЗА

Учебное пособие

Самара
Самарский государственный технический университет
2024

Печатается по решению методического совета электротехнического факультета СамГТУ (протокол № 8 от 01.04.2024 г.).

УДК 62-83(075.8)

ББК 31.291я73

А 132

Абакумов А.М.

Энергосберегающий электропривод в системах магистрального транспорта природного газа: учеб. пособие / *А.М. Абакумов, В.Н. Овсянников.* – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2024. – 83 с.

Приведены общие сведения о магистральном транспорте природного газа, энергетическом оборудовании компрессорных станций, управлении установками охлаждения газа, рассмотрены вопросы повышения энергетической эффективности технологического процесса охлаждения природного газа за счет использования частотно-регулируемого привода вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения газа. Обсуждаются задачи проектирования и моделирования систем автоматического управления температурой газа на выходе установок охлаждения.

Предназначено для студентов бакалавриата и магистратуры высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника». Может быть использовано студентами родственных направлений подготовки.

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор *Ю.А. Макаричев*,
д-р техн. наук, профессор *П.К. Кузнецов*

УДК 62-83(075.8)

ББК 31.291я73

А 132

© А.М. Абакумов, В.Н. Овсянников, 2024

© Самарский государственный

технический университет, 2024

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое издание адресовано, прежде всего, студентам магистратуры, обучающимся по программе «Современные технологии в электромеханике и автоматизированном электроприводе», осваивающим дисциплину «Энергосберегающие технологии транспорта газа», и может быть полезно студентам бакалавриата и магистратуры направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника».

В первом разделе учебного пособия приведены основные сведения о технологическом процессе транспорта природного газа и газотранспортной системе РФ.

Во втором разделе рассмотрено основное энергетическое оборудование компрессорных станций магистральных газопроводов – приводы газоперекачивающих агрегатов и электроприводы вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения газа. Обсуждаются достоинства и недостатки газотурбинных и электроприводных центробежных нагнетателей, приведены сведения о назначении, конструктивном исполнении установок охлаждения газа и решаемых с их помощью задачах.

В третьем разделе исследуются энергетические показатели установок охлаждения газа при дискретном способе регулирования температуры газа на выходе установок.

В четвертом разделе обсуждаются вопросы оптимизации режимов работы установки охлаждения газа при дискретном регулировании за счет учета индивидуальных характеристик аппаратов воздушного охлаждения.

В пятом разделе рассмотрена возможность существенного повышения энергоэффективности установок охлаждения газа при использовании непрерывного регулирования скорости вентиляторов аппаратов охлаждения с помощью частотно-регулируемого привода.

В шестом разделе решается задача дополнительного снижения затрат электроэнергии на нужды охлаждения за счет оптимизации алгоритмов управления частотно-регулируемыми приводами вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения с учетом их индивидуальных характеристик.

В седьмом разделе приведена методика оценки технико-экономической эффективности использования частотно-регулируемого электропривода в установках охлаждения газа.

В восьмом разделе рассмотрены вопросы построения систем автоматического управления температурой газа на выходе установки охлаждения с частотно-регулируемым приводом вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения.

В девятом разделе приведено математическое описание процесса охлаждения газа в аппаратах охлаждения как объекта управления, рассмотрена методика расчета и компьютерного моделирования системы автоматического управления температурой газа.

Все разделы пособия содержат контрольные вопросы. Расчетные задания и примеры их выполнения, содержащиеся в основных разделах, могут быть использованы для проведения лабораторных работ и практических занятий.

ВВЕДЕНИЕ

Единая система газоснабжения РФ, включающая систему магистральных газопроводов, является одной из самых протяженных в мире и функционирует в различных природно-климатических условиях – от арктической до субтропической зоны.

В соответствии с «Энергетической стратегией России на период до 2030 года» (Стратегия) [15] и Федеральным законом от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» одним из стратегических направлений долгосрочной государственной энергетической политики России является повышение энергетической эффективности экономического комплекса страны на основе внедрения экологически чистых и ресурсосберегающих технологий и реализации инновационных высокоэффективных энергосберегающих проектов.

Как указано в Стратегии, «Энергетика Российской Федерации, основой которой является топливно-энергетический комплекс, вносит значительный вклад в национальную безопасность и социально-экономическое развитие страны. Топливо-энергетический комплекс Российской Федерации включает в себя нефтяную, газовую, угольную и торфяную отрасли, электроэнергетику и теплоснабжение, играет ключевую роль в формировании доходов бюджетной системы Российской Федерации».

Газовая промышленность является одной из немногих фундаментальных государствообразующих отраслей экономики России и обеспечивает почти 50 % потребностей страны в топливно-энергетических ресурсах. Надежное энергообеспечение и эффективное использование электроэнергии является основой стабильного функционирования Единой системы газоснабжения в целом.

В Стратегии также указывается, что «Главной проблемой в сфере снижения энергоемкости экономики является значительный нереализованный потенциал организационного и технологического

энергосбережения, составляющий до 40 % общего объема внутреннего энергопотребления».

Ведущее предприятие газовой отрасли ПАО «Газпром» рассматривает приоритетным направлением деятельности повышение эффективности использования энергоресурсов (природного газа, электрической и тепловой энергии) во всех видах деятельности – добыче газа, конденсата нефти, транспортировке и подземном хранении природного газа, переработке углеводородного сырья, распределении газа потребителям.

Целевая направленность на реализацию в компании инновационных высокоэффективных энергосберегающих технологий отражена в «Концепции энергосбережения и повышения энергетической эффективности в ОАО «Газпром» на период 2011–2020 гг.» и других документах.

Поскольку наибольшее количество энергоресурсов (около 75 %) расходуется в магистральном транспорте газа, важнейшей задачей в газовой отрасли является повышение энергетической эффективности транспортировки газа.

В пособии приведены сведения об энергетическом оборудовании основных технологических установок магистральных систем транспорта газа и рассмотрены возможности повышения его энергоэффективности за счет использования частотно-регулируемого привода.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАГИСТРАЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ ГАЗА

Месторождения газа в России расположены на значительном удалении от потребителей, поэтому эффективность и надежность функционирования газовой промышленности во многом зависят от надежной и безопасной работы трубопроводных систем, от снижения затрат на транспорт газа.

При транспортировке природного газа происходит снижение его давления из-за аэродинамического сопротивления магистрального трубопровода (МГ). Для поддержания заданного давления в магистрале производится компримирование (сжатие) газа на компрессорных станциях (КС), которые сооружают на трассе газопровода через каждые 100–120 км.

Так через Самарскую область проходят три крупнейших российских газопровода: Челябинск – Петровск, Уренгой – Петровск, Уренгой – Новопсковск, эксплуатируется 17 компрессорных станций, и транспортируется около 15 % объема добываемого в России природного газа.

Повышение давления газа на КС до заданного значения (7,5 МПа) осуществляется в одну или несколько ступеней с помощью газоперекачивающих агрегатов (ГПА) с центробежными или поршневыми нагнетателями. Преимущественное распространение на КС МГ получили центробежные нагнетатели. В качестве привода нагнетателей ГПА используются электрические двигатели, газовые турбины и поршневые двигатели. Представление о внешнем виде КС МГ дает рис. 1.1.

Компрессорные цеха с ГПА являются основным технологическим объектом КС (рис. 1.2).

Другой важнейшей частью технологического процесса транспорта газа является его охлаждение перед подачей в линейную часть газопровода. Она решается с помощью установок охлаждения природного газа после компримирования.



Рис. 1.1. Внешний вид компрессорной станции



Рис. 1.2. Внешний вид компрессорного цеха

Контрольные вопросы

1. Поясните назначение компрессорных станций.
2. Какие типы приводов используются для нагнетателей?

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ

2.1. ПРИВОДЫ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

Основная задача эксплуатационной службы компрессорной станции заключается в перекачке природного газа в заданных количествах и подаче давления в линейную систему магистральных газопроводов. Следовательно, основным звеном в цепи средств производства на КС является газоперекачивающий аппарат. В состав ГПА входят турбонагнетатель (компрессор) и приводной двигатель. Турбонагнетатели являются, как правило, очень надежными машинами, обладающими относительно небольшими габаритами. В зависимости от модели требуемая частота вращения вала нагнетателя составляет от 9000 до 15000 об/мин.

Для привода ГПА преимущественно используется электропривод или газотурбинный привод. Рассмотрим особенности газотурбинных и электроприводных ГПА [2, 14].

В настоящее время около 86 % суммарной мощности ГПА на МГ России составляет газотурбинный привод нагнетателей. Около 13 % мощности ГПА приходится на электропривод, остальная мощность приходится на газомотокомпрессоры.

Главными факторами, определившими сложившуюся структуру ГПА, являются известные *достоинства газотурбинного привода*:

- независимость компрессорной станции от крупного внешнего источника электроснабжения;
- относительно низкие капитальные вложения в строительство турбоприводных ГПА;
- возможности использования природного газа для сжигания в камерах сгорания газотурбинных установок;
- возможность достижения требуемой частоты вращения без использования редуктора и возможность регулирования в небольшом диапазоне скорости газотурбинного привода нагнетателей.

Вместе с тем газотурбинный привод центробежных нагнетателей имеет *ряд существенных недостатков*. Это низкий КПД, экологическое загрязнение окружающей среды окислами азота и углекислым газом.

Мощность и КПД газотурбинного привода существенно зависят от температуры наружного воздуха, что ведет к снижению экономических показателей этого типа привода в летний период времени.

Электроприводные ГПА (ЭГПА), лишенные указанных недостатков, выполняются в настоящее время в основном нерегулируемыми по частоте вращения. Далее такой тип привода будем называть нерегулируемым, хотя фактически приводы с синхронными электродвигателями оснащаются системами автоматического регулирования возбуждения.

Следует учитывать, что обязательным условием использования электроприводных ГПА является наличие крупного и надежного источника электроснабжения.

Для газотранспортных нагнетателей необходимы приводы с большой частотой вращения и мощностью в несколько мегаватт. Синхронная частота вращения n_c электродвигателя определяется частотой f напряжения на статоре и числом пар p полюсов двигателя:

$$n_c = \frac{60f}{p}.$$

В большинстве случаев для прямого соединения с нагнетателем достигаемая частота вращения является недостаточной, так как частота сетевого напряжения составляет 50 Гц, а минимальное значение числа пар полюсов $p = 1$.

Наибольшее значение синхронной частоты вращения двухполюсных трехфазных двигателей в сети с частотой 50 Гц составляет 3000 об/мин. Ввиду того что для газотранспортных нагнетателей нужны большие частоты вращения, на практике между двигателем и нагнетателем устанавливается редуктор, передаточное число которого можно точно адаптировать с учетом специфики каждого конкретного нагнетателя.

Наличие редуктора (мультипликатора) снижает примерно на 2 % общий КПД электропривода. Для исключения мультипликатора из кинематической схемы и создания безредукторного привода необходима разработка высокоскоростных электродвигателей и частотных преобразователей, обеспечивающих повышенную по сравнению с сетевой частоту напряжения питания статорных обмоток.

Что касается выбора двигателей трехфазного тока, то здесь имеются два варианта: асинхронные короткозамкнутые двигатели (АД) и синхронные двигатели (СД).

Нерегулируемые по частоте вращения электроприводы с СД по сравнению с приводами, в которых используются асинхронные двигатели, имеют ряд преимуществ. Это обусловило широкое применение СД в приводах ГПА КС.

К основным *достоинствам СД по сравнению с АД* следует отнести:

- более высокий КПД, достигающий 0,95–0,98;
- постоянство частоты вращения в установившихся режимах;
- возможность за счет регулирования возбуждения СД управлять знаком и величиной его реактивной мощности, т. е. обеспечивать режим потребления реактивной мощности и режим ее генерации; отмеченная компенсирующая способность СД позволяет также в некоторых пределах регулировать уровни напряжения в узлах нагрузки систем электроснабжения;
- меньшую чувствительность СД к отклонениям и колебаниям сетевого напряжения, что особенно при использовании систем автоматического регулирования возбуждения обеспечивает повышенную статическую и динамическую устойчивость СД при изменениях сетевого напряжения;
- возможность обеспечения высокой динамической устойчивости СД в условиях быстрых изменений нагрузки двигателя за счет использования автоматического регулирования возбуждения;
- возможность изготовления электрических машин большой единичной мощности на повышенную частоту вращения;
- высокую эксплуатационную надежность и стабильность характеристик в условиях постепенного износа подшипников, что связано с увеличенным воздушным зазором.

К **недостаткам СД** следует отнести:

- необходимость системы регулирования возбуждения;
- более сложный пуск СД, чем асинхронных;
- более сложную конструкцию СД по сравнению с АД.

Компрессорные цеха КС относятся к классу взрывоопасных помещений, что диктует использование взрывозащищенного электрооборудования [2]. Учитывая это обстоятельство, СД имеют еще один недостаток – скользящий контакт. Постоянный ток возбуждения на обмотку ротора, как правило, подается через угольные щетки и контактные кольца. Для повышения износостойкости, надежности на установках, работающих во взрывоопасных зонах, разработана система **бесщеточного возбуждения СД** (рис. 2.1).

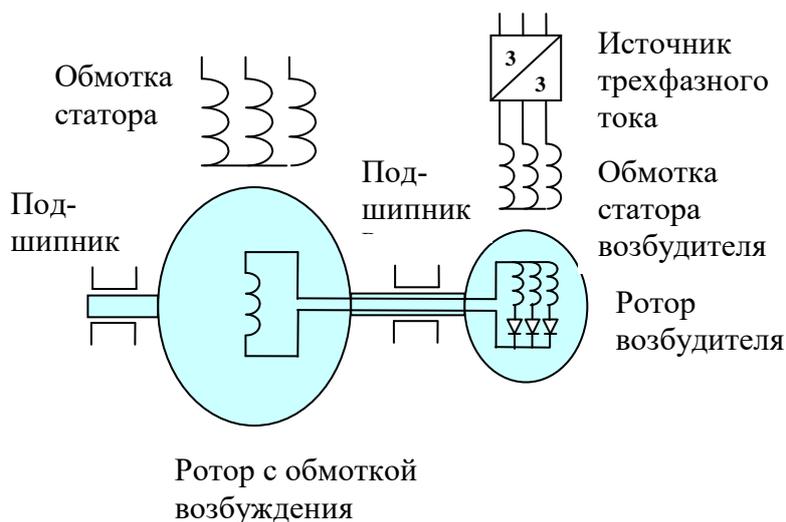


Рис. 2.1. Принципиальная схема бесщеточного возбуждения

На одном валу с ротором синхронного электродвигателя размещен асинхронный возбудитель без собственных подшипников. Обмотка статора возбудителя, подключенная через источник трехфазного тока к сети 50 Гц, индуцирует в обмотке ротора переменное напряжение, выпрямляемое диодами. Выпрямленное напряжение подводится к обмотке возбуждения проводниками, размещенными в полом валу. Схема обеспечивает подачу полного напряжения возбуждения при неподвижном роторе (принцип трансформатора). При работе синхронный электродвигатель вращается против вращающегося

магнитного поля возбуждителя, при этом желаемое значение тока возбуждения СД можно устанавливать с помощью источника трехфазного тока.

Для современных (особенно высокоскоростных) двигателей вместо опор на подшипниках все более широкое применение получают *магнитные подвесы*.

К достоинствам магнитных подвесов можно отнести:

- снижение коэффициента трения в опорах и возможность использования высокоскоростных двигателей;
- отказ от масляной системы;
- повышение готовности агрегата к пуску за счет исключения необходимости подготовки масляной системы;
- высокую пригодность к телеуправлению;
- низкую потребность в техобслуживании;
- низкие потери мощности и соответственно увеличение КПД установки.

Работы в направлении создания безредукторного частотно-регулируемого электропривода с СД и АД ведутся в России и особенно интенсивно – за рубежом.

Результаты исследования частотно-регулируемых высокоскоростных, безредукторных приводов свидетельствуют о существенных технико-экономических преимуществах их использования.

Имеются сведения об успешном промышленном применении регулируемых приводов большой мощности, разработанных разными фирмами [2].

Так, фирма *Alstom* совместно с фирмой *MAN/SulzerTurbo* реализует проект по разработке высокоскоростного асинхронного двигателя для турбокомпрессора. Результатом работы явилось создание интегральной технологии «компрессор – двигатель», получившей название *MOTOR PIPELINE COMPRESSOR – MOPICO* (рис. 2.2).

Ротор асинхронного двигателя установлен на магнитных подвесах и с обеих сторон несет по одному рабочему колесу компрессора. Пара колес компрессора образует по одной ступени сжатия.

В зависимости от желаемой степени сжатия рабочие колеса могут работать либо параллельно, либо последовательно. Компрессорная технология *MORISO*, в отличие от обычных приводов, обеспечивает рабочий режим без высоконапорных уплотнений, так как корпус двигателя находится под рабочим давлением трубопроводной системы.

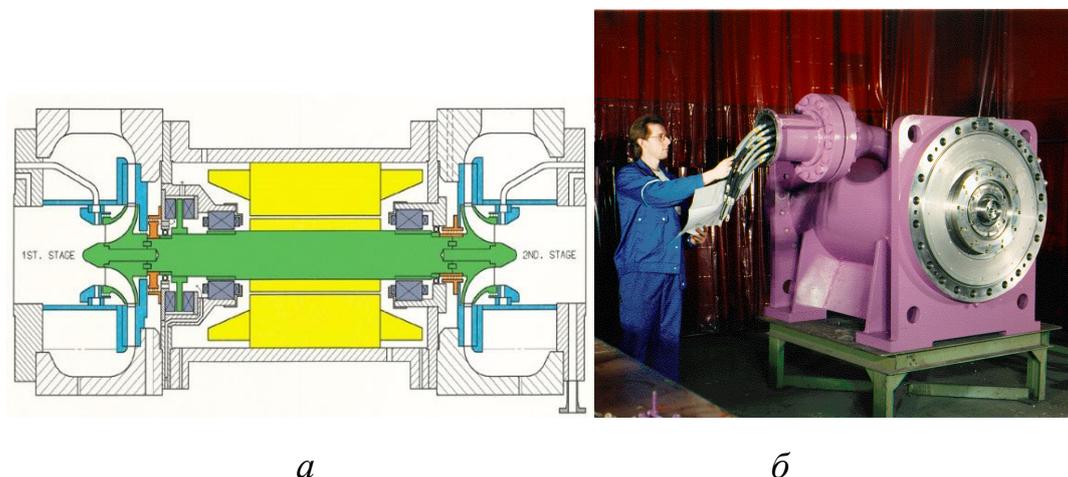


Рис. 2.2. Двигатель *MORISO*. Номинальная мощность 6 МВт:

a – разрез; *б* – часть двигателя

В то же время высокопрочное исполнение корпуса двигателя требует высокопрочной герметизированной конструкции канала для подвода кабелей питания обмотки статора.

Разработка высокоскоростных частотно-регулируемых приводов для предприятий ПАО «Газпром» ведется также в России. При этом ставятся задачи замены существующих нерегулируемых ЭГПА на:

- более совершенные – регулируемые с номинальной частотой вращения 3 000 об/мин с цифровой системой возбуждения синхронного двигателя и тиристорным преобразователем частоты, совмещающим функции устройства мягкого пуска и регулирования скорости в диапазоне 0,5–1,05 от номинальной;

- безредукторные электроприводы с высокоскоростными асинхронными двигателями на магнитном подвесе;

- комплектные агрегаты, выполненные по схеме *MORISO*.

К настоящему времени изготовлен комплектный регулируемый электропривод мощностью 6 300 кВт для одной КС Поволжского региона. В состав привода входят синхронный электродвигатель

с бесщеточным асинхронным возбудителем, тиристорный преобразователь частоты и система автоматического управления. Привод обеспечивает регулирование скорости от 1 800 до 3 150 об/мин.

Электроприводные газоперекачивающие агрегаты фирмы «Лысьва – Восток» выполнены на базе высокоскоростных асинхронных электродвигателей мощностью 4 000 кВт с частотой вращения 8 200 об/мин с электромагнитным подвесом ротора. Электропривод обеспечивает регулирование частоты вращения в диапазоне 0,6–1,05 от номинальной.

В настоящее время реализованы технические решения по применению регулируемого электропривода мощностью 25 МВт на двух КС Центрального региона. Электропривод реализован по схеме вентильного двигателя на синхронном двигателе с номинальной частотой вращения 3 700 об/мин с частотным регулированием скорости от 2 600 до 3 900 об/мин.

Контрольные вопросы

1. Проведите сравнительный анализ достоинств и недостатков использования газотурбинных двигателей и электродвигателей для привода ГПА.
2. Укажите достоинства и недостатки использования АД и СД для привода ГПА.
3. Укажите основные особенности компрессорной технологии *MORICO*.

2.2. УСТАНОВКИ ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ УСТАНОВОК

Неотъемлемой частью технологического процесса при транспортировке газа по магистральным газопроводам является его охлаждение [7–13]. В процессе компримирования газ нагревается, что вызывает ряд нежелательных последствий, устранить которые призваны установки охлаждения газа (УОГ).

Снижение температуры газа после КС на входе в линейную часть (трубопровод) МГ позволяет решить ряд задач:

– повысить плотность газа, снизить скорость течения и уменьшить потери давления в газопроводе. В итоге, это позволяет увеличить пропускную способность МГ и сэкономить топливный газ на работу ГПА;

– предохранить изоляцию труб от разрушения при высоких температурах транспортируемого газа (более 45 °С) после его сжатия на КС. Колебания температуры газа приводят к ускорению по времени и усилению по интенсивности протекания процессов коррозии металла трубы и, соответственно, к сокращению срока службы МГ. За последние годы число разрушений газопроводов по причине стресс-коррозии составило 82 % от всех аварий, большинство аварий приходится на «горячие» участки газопровода (20–30 км после КС). При отсутствии либо неэффективном использовании установок охлаждения газа, температура газа, поступающего в газопровод, практически повторяет суточные и климатические колебания температуры воздуха. Доказано, что такое изменение температуры газа приводит к активизации коррозионных процессов в 6,9–11,2 раза по сравнению со стабилизированной температурой. Основной мерой по борьбе со стресс-коррозией признана *стабилизация температуры* на выходе УОГ;

– газоносные месторождения расположены преимущественно в северных широтах, в районах залегания многолетнемерзлых грунтов. При транспортировке газа по магистральным газопроводам подземного исполнения существует опасность размораживания вечной мерзлоты, «всплывания» магистрального газопровода на поверхность при нагреве грунта и разрушения материала трубопровода;

– температурный перепад на участке газопровода между компрессорными станциями приводит к продольным температурным напряжениям и деформации трубопровода.

Типовая установка охлаждения газа состоит из нескольких параллельно включенных аппаратов воздушного охлаждения газа (АВО).

Каждый аппарат содержит теплообменник с перекрестным направлением потоков охлаждающего воздуха и газа и вентиляторы, обеспечивающие создание потока охлаждающего воздуха (рис. 2.3–2.5).

Поток охлаждающего воздуха сквозь несколько слоев оребренных труб, по которым прокачивается охлаждаемый газ, обеспечива-

ется либо за счет естественной вентиляции при достаточно низкой температуре охлаждающего воздуха, либо за счет включения вентиляторов АВО.

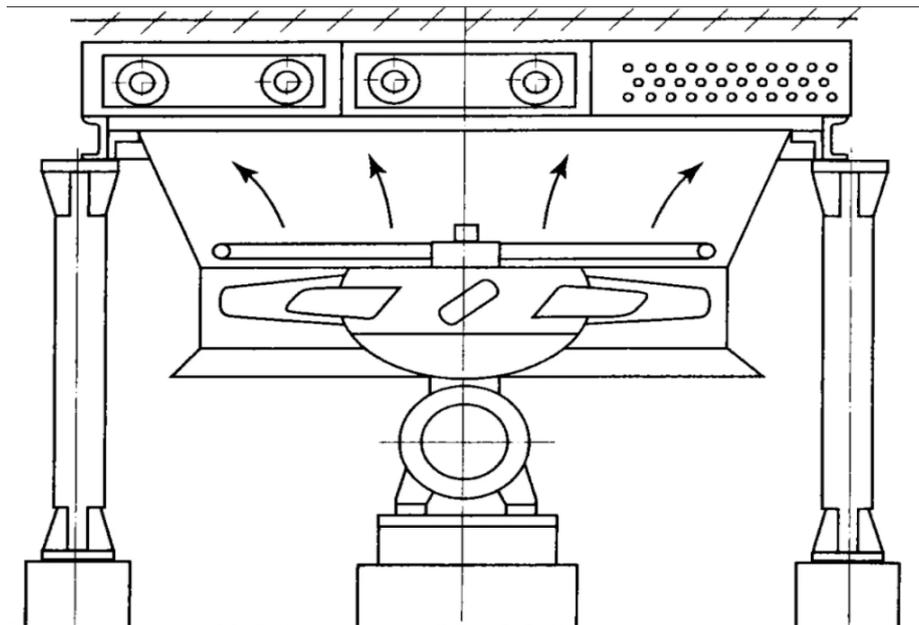


Рис. 2.3. Схема АВО

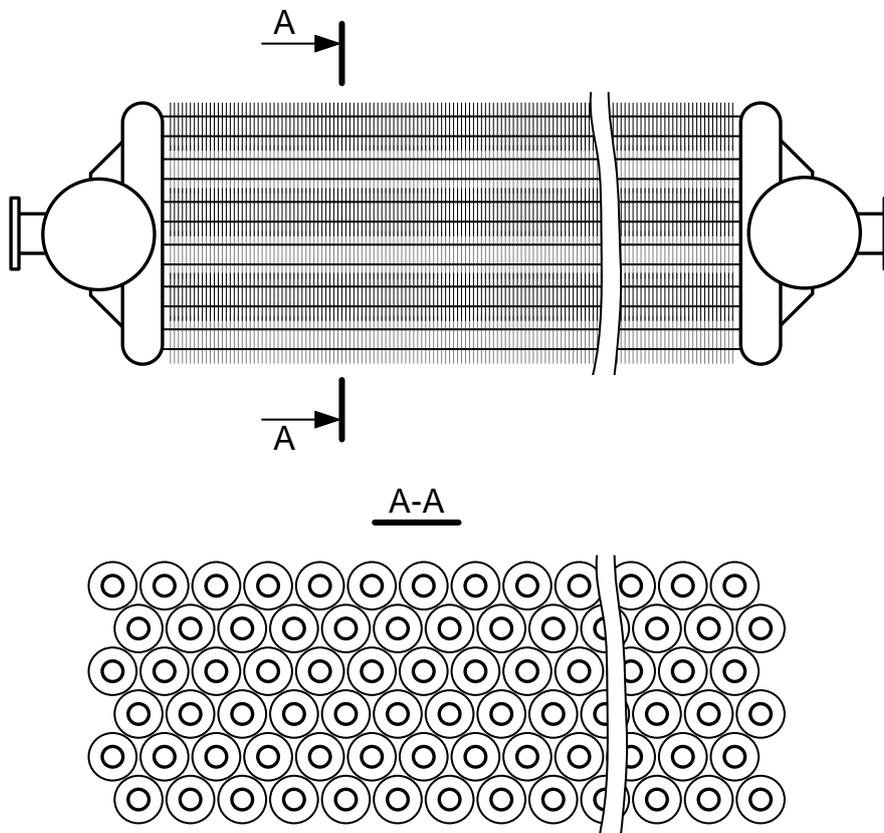


Рис. 2.4. Схема теплообменника



*Рис. 2.5. Внешний вид АВО
(стадия монтажа)*

Схема параллельного включения АВО приведена на рис. 2.6.

После компримирования газ под рабочим давлением около 7,5 МПа поступает на УОГ и приблизительно равномерно распределяется по отдельным АВО. Охлаждаемый газ протекает по трубчатым теплообменным секциям (теплообменникам) аппаратов воздушного охлаждения АВО-1...АВО-N.

За счет теплообмена с принудительно перемещаемым потоком воздуха происходит более интенсивное снижение температуры газа. Охлажденный газ поступает в выходной коллектор и далее в трубопровод.

В состав каждого АВО, чаще всего, входят два вентилятора. Каждый вентилятор АВО включается независимо.

Внешняя технологическая обвязка АВО выполнена по параллельной схеме, которая предполагает распределение охлаждаемого газа равномерно на все аппараты. Важное преимущество этой схемы – простота трубопроводных коммуникаций, возможность регулирования температуры отключением поверхности теплообмена с помощью кранов К1.1, К1.2...КN.1, КN.2 и вентиляторов. Для подачи газа в выходной коллектор, минуя секции охладителей, предусмотрен кран

байпасирования КЗ. Количество аппаратов (обычно от 8 до 24), входящих в установку охлаждения газа, зависит от типа ГПА и климатических условий работы КС МГ.

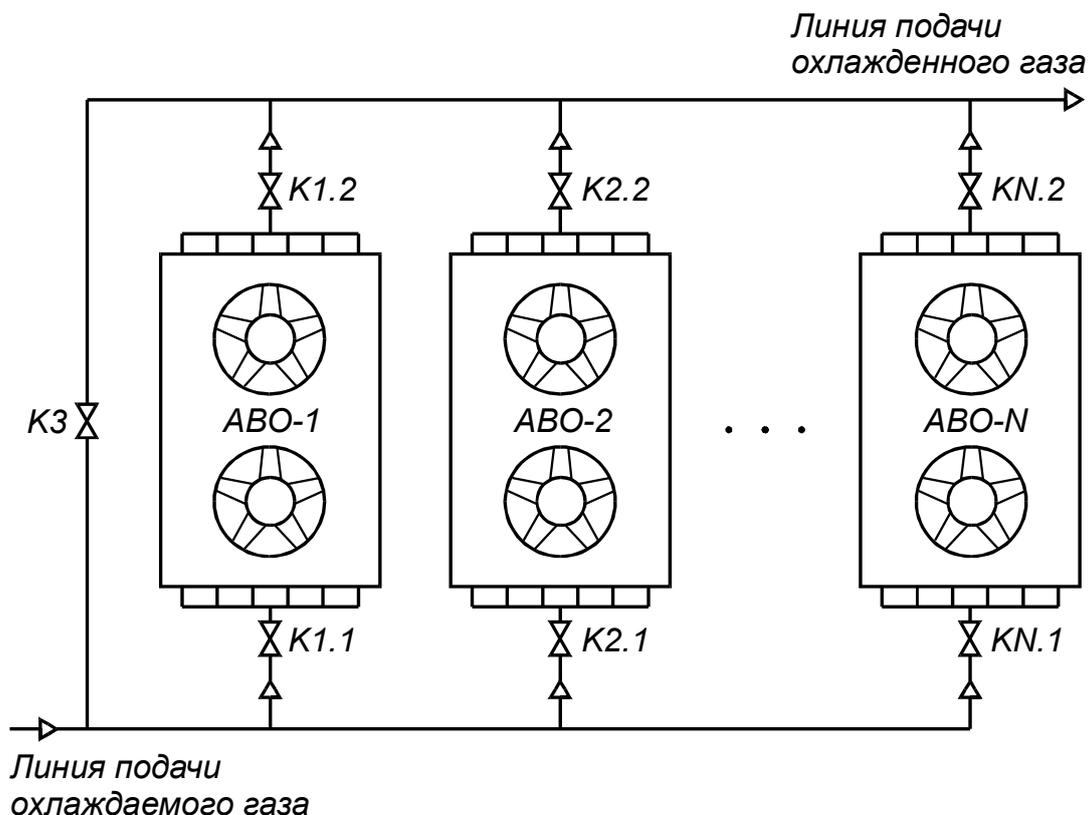


Рис. 2.6. Типовая схема включения АВО в установке охлаждения газа

В настоящее время на газопроводах страны эксплуатируется свыше шести тысяч УОГ различных типов. Конструктивные различия АВО газа заключаются в способе пространственного расположения теплопередающей поверхности и взаимном расположении теплопередающей поверхности и вентилятора, обеспечивающего перемещение охлаждающей среды. Наиболее часто АВО газа выполняют в виде горизонтальных теплообменных секций из оребренных труб в комплекте с электроприводными вентиляторами осевого типа.

Широкое распространение получили аппараты с **нагнетательной тягой**, у которых вентиляторы расположены под трубным пучком (рис. 2.7). Это, прежде всего, аппараты отечественного производства типа 2АВГ-75, в которых колесо вентилятора устанавливается непосредственно на вал электродвигателя (см. рис. 2.3, 2.5). Диаметр

колеса вентилятора составляет 5 м, и для привода вентиляторов применяются специальные тихоходные электродвигатели серии *ВАСО* мощностью 37 кВт, которые имеют низкий коэффициент мощности даже в номинальном режиме.



Рис. 2.7. УОГ с АВО газа типа 2АВГ-75С
нагнетательного типа

На КС МГ применяются также установки воздушного охлаждения ряда зарубежных фирм. В этих установках вентиляторы расположены над трубным пучком, поэтому интенсификация теплообмена осуществляется за счет *вытяжной тяги*. Скоростное поле потока воздуха, входящего в теплообменную секцию, более равномерно, чем в установках с нагнетательной тягой, а высокая скорость его на выходе из вентилятора исключает рециркуляцию, теплообменные секции лучше защищены от осадков и практически полностью от солнечной радиации. По сравнению с нижним расположением вентиляторов более эффективно используется естественная конвекция. В качестве примера на рис. 2.8 показана установка охлаждения газа вытяжного типа фирмы «Хадсон – Италия».

При верхнем расположении вентилятора его рабочее колесо соединяется с валом электродвигателя через клиноременную переда-

чу в антистатическом исполнении, с помощью которой происходит снижение частоты вращения вентилятора до заданной величины. В такой конструкции АВО для привода могут быть использованы электродвигатели с синхронной частотой вращения до 1500 об/мин, которые имеют более высокие энергетические показатели, чем тихоходные электродвигатели типа *ВАСО*. Вместе с тем, дополнительный элемент трансмиссии уменьшает КПД и надежность системы в целом.



Рис. 2.8. УОГ с АВО газа
«Хадсон – Италияно» вытяжного типа

В существующих системах управления контроль температуры газа после УОГ предусмотрен после его смешения в выходном коллекторе.

АВО всех типов, используемые в ПАО «Газпром», эксплуатируются в широком диапазоне температур наружного воздуха. В природных условиях практически всей зоны деятельности этот диапазон составляет $-45...+30$ °С.

В подавляющем большинстве систем охлаждения газа, которые в настоящее время эксплуатируются на КС МГ, требуемая температура газа на выходе УОГ обеспечивается за счет включения или отключения вентиляторов в сочетании с сезонной регулировкой угла атаки лопастей.

Типовая *схема электроснабжения* АВО газа показана на рис. 2.9.

В соответствии с требованиями нормативных документов комплектные трансформаторные подстанции (КТП) имеют по два понижительных трансформатора Т1 и Т2, допустимая нагрузка которых составляет 50 или 70 % для объектов 1-й и 2-й категории электроснабжения соответственно. На КТП отечественного производства устанавливают, в основном, трансформаторы типа ТМЗ с номинальной мощностью 630 или 1000 кВА.

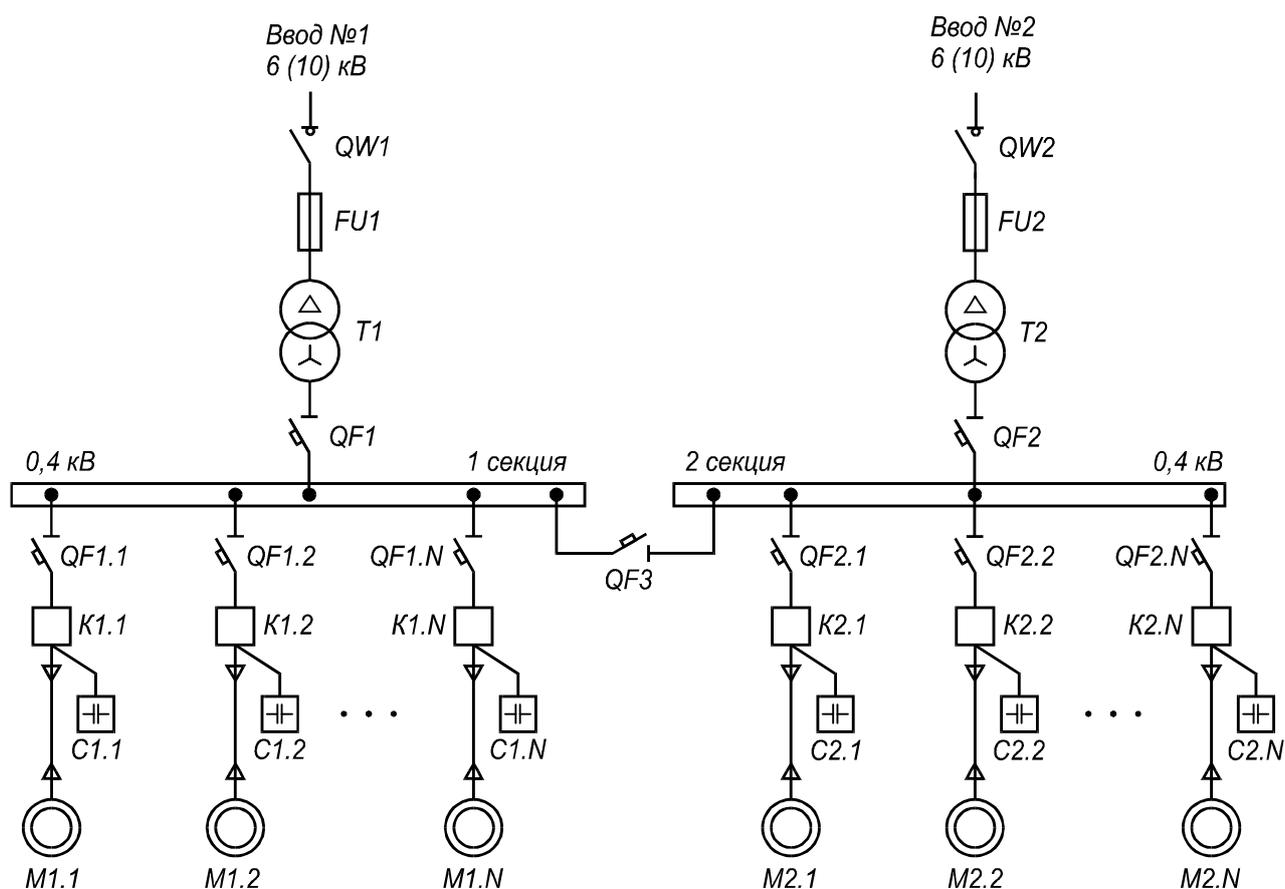


Рис. 2.9. Типовая схема электроснабжения УОГ

Первичные обмотки трансформаторов подключают к кабельным линиям 6(10) кВ через выключатели нагрузки QW1, QW2 и предохранители FU1, FU2. Подача напряжения на шины секций 0,4 кВ осуществляется с помощью автоматических выключателей QF1, QF2. Для перевода электроснабжения всех потребителей на один из трансформаторов в случае неисправности другого трансформатора служит секционный выключатель QF3.

На отечественных КС преимущественно используются АВО типа 2АВГ-75 с двумя электродвигателями мощностью по 37 кВт. Электродвигатели вентиляторов М1.1...М1.Н и М2.1...М2.Н получают питание по кабелям, которые проложены на эстакадах и подключаются к шинам секций 0,4 кВ через автоматические выключатели QF1.1...QF1.Н, QF2.1...QF2.Н и магнитные пускатели (контакторы) К1.1...К1.Н, К2.1...К2.Н. Аппаратура управления типовой схемы позволяет осуществлять только прямые пуски двигателей, которые приводят к переходным процессам со значительными перегрузками, как для элементов схемы электроснабжения, так и механических узлов АВО.

Для уменьшения потерь мощности и обеспечения нагрузочной способности трансформаторов параллельно электродвигателям подключают конденсаторы С1.1...С1.Н и С2.1...С2.Н, параметры которых выбираются исходя из условия компенсации реактивной мощности соответствующего электродвигателя в номинальном режиме. Возможны также варианты применения централизованной компенсации реактивной мощности.

Охлаждение технологического (транспортируемого) газа в АВО является достаточно энергоемким процессом. Мощность, потребляемая электродвигателями АВО одного КЦ, составляет сотни киловатт, что оказывает существенное влияние на структуру электропотребления КС, особенно с газотурбинным приводом нагнетателей. В этих случаях АВО газа следует считать самостоятельным технологическим объектом энергопотребления КС.

Расход электроэнергии на охлаждение компримированного газа может составлять 60–70 % и более общего электропотребления на товаротранспортную работу.

Таким образом, повышение эффективности работы установок, осуществляющих охлаждение компримированного газа, является важным фактором экономии топливно-энергетических ресурсов и снижения себестоимости транспортировки газа.

Контрольные вопросы

1. С какой целью охлаждают газ после копримирования?
2. Назовите основные элементы АВО.
3. Укажите достоинства и недостатки АВО нагнетательного и вытяжного типа.
4. За счет чего регулируется температура на выходе УОГ?
5. Какова доля электроэнергии, потребляемой вентиляторами АВО на КС с газотурбинным приводом ГПА?
6. Как обеспечивается компенсация реактивной мощности электроприемников УОГ?

3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ДИСКРЕТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ

3.1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

На компрессорных станциях магистральных газопроводов АВО используются для охлаждения природного газа после сжатия (компримирования). На газотранспортных предприятиях установки воздушного охлаждения газа являются составной частью технологического комплекса магистрального транспорта газа.

Установка охлаждения состоит из нескольких АВО, параллельно соединенных между собой.

В состав каждого АВО установки входят:

- двухсекционный теплообменник;
- два вентилятора с приводными электродвигателями.

В наиболее распространенном АВО типа 2АВГ-75 под теплообменником устанавливаются два вентилятора, каждый из которых обдувает соответствующую секцию (часть) теплообменника.

Каждая часть теплообменника АВО в стационарном режиме обеспечивает определенное снижение (перепад) температуры ΔT . Перепад температуры в частях теплообменника зависит от частоты вращения двигателя вентилятора, температуры газа на входе в теплообменник, температуры наружного воздуха, расхода газа через АВО [4–13].

Эффективность работы АВО наиболее сильно зависит от температуры наружного воздуха. При высоких температурах наружного воздуха эффективность охлаждения снижается. Следовательно, количество аппаратов охлаждения выбирают так, чтобы обеспечить требуемое охлаждение газа в наиболее неблагоприятных условиях (в летнее время). При низких температурах наружного воздуха (зимой) эффективность охлаждения газа увеличивается и тепловая мощность АВО оказывается избыточной.

Задача управления установкой охлаждения заключается в том, чтобы обеспечить требуемое значение температуры газа на выходе

установки за счет снижения температуры газа на определенную величину, т. е. создания определенного температурного перепада. Температурный перепад на большинстве УОГ регулируется дискретно (включением / отключением вентиляторов). При низкой температуре наружного воздуха часть двигателей вентиляторов можно отключать, при этом уменьшается потребляемая двигателями мощность, обеспечивается снижение расхода электроэнергии.

Дискретное регулирование температуры газа на выходе установки охлаждения осуществляется оператором. Он должен непрерывно следить за показаниями датчика температуры газа на выходе установки и выработать соответствующие команды. Включение (пуск) двигателя (двигателей) вентилятора осуществляется по команде оператора с помощью релейно-контакторной схемы прямым включением в сеть. Пуск двигателя носит затяжной характер из-за большого момента инерции (диаметр колеса вентилятора 5 м) и сопровождается большими пусковыми токами, в 5–7 раз превышающими номинальное значение, что приводит к колебаниям напряжения в питающей сети.

Температура на выходе установки охлаждения изменяется, прежде всего, вследствие суточного хода температуры наружного воздуха. Это приводит к необходимости частых пусков двигателей, их преждевременному износу и высокой нагрузке оператора.

При дискретном регулировании температуры газа включение одного вентилятора дает на выходе АВО некоторый температурный перепад ΔT_1 .

Для нахождения температурного перепада (глубины охлаждения) при номинальной частоте вращения обоих вентиляторов используются тепловые характеристики аппарата воздушного охлаждения, приведенные на рис. 3.1. Исходными данными для их использования являются температура газа t_1 на входе АВО, температура наружного воздуха τ_1 и расход газа G через АВО.

Поясним порядок использования тепловых характеристик. Например, при $t_1 = 31\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau_1 = 0\text{ }^\circ\text{C}$ и $G = 62\text{ кг/с}$ рассчитывают $t_1 - \tau_1 = 31\text{ }^\circ\text{C}$, по номограмме находят точку пересечения линии рас-

хода $G = 62 \text{ кг/с}$ с кривой $t_1 - \tau_1 = 31 \text{ }^\circ\text{C}$. Опуская из точки пересечения указанных линий перпендикуляр, получают температурный перепад (глубину охлаждения газа) на АВО при номинальной частоте вращения двух вентиляторов $\Delta T_2 \approx 16 \text{ }^\circ\text{C}$. Температурный перепад при включении одного вентилятора можно приближенно считать вдвое меньше $\Delta T_1 \approx 0,5 \cdot \Delta T_2 \approx 8 \text{ }^\circ\text{C}$.

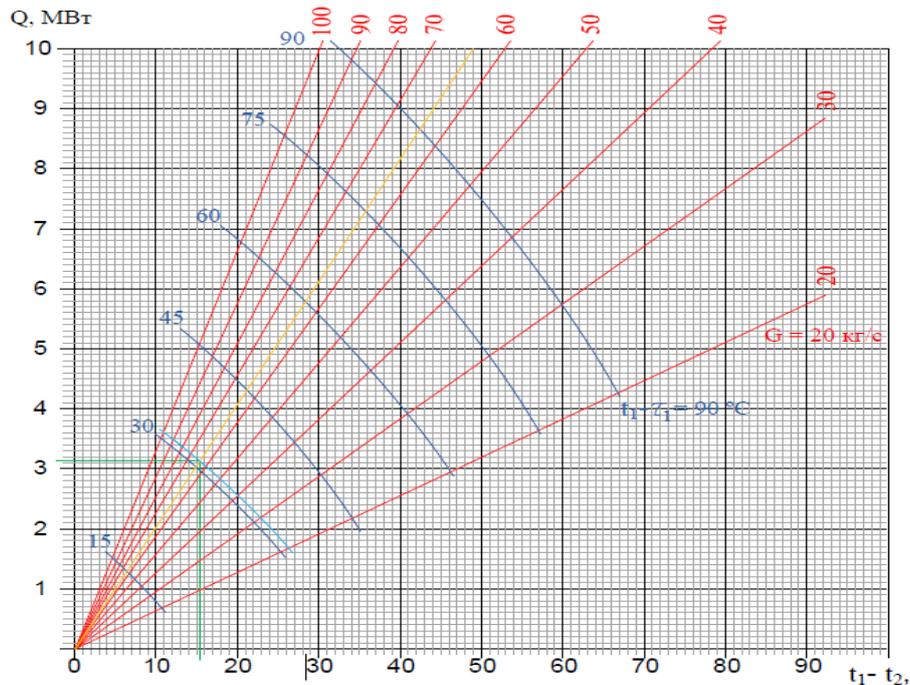


Рис. 3.1. Номограмма для теплового расчета аппарата воздушного охлаждения газа 2АВГ-75

Общий температурный перепад на выходе УОГ при допущении о равномерном распределении потока газа по аппаратам воздушного охлаждения и равенстве глубины охлаждения на каждом аппарате определяется соотношением

$$\Delta T_{\text{уог}} = \frac{m}{N_{\text{аво}}} \Delta T_1, \quad (3.1)$$

где $N_{\text{аво}}$ – количество аппаратов воздушного охлаждения в составе УОГ;
 m – число включенных вентиляторов.

Учитывая, что

$$N_{\text{аво}} = N/2,$$

где N – общее число вентиляторов, можно записать

$$\Delta T_{\text{уог}} = 2 \frac{m}{N} \Delta T_1. \quad (3.2)$$

Очевидно, что число включенных вентиляторов нужно выбирать так, чтобы общий температурный перепад был не меньше требуемого:

$$\Delta T_{\text{уог}} \geq \Delta T_{\text{тр}}.$$

При дискретном регулировании включение каждого вентилятора ведет к увеличению мощности на величину номинальной мощности $P_{\text{н}}$ двигателя вентилятора.

Мощность, потребляемая на охлаждение

$$P_{\text{уог}} = m P_{\text{н}}. \quad (3.3)$$

В качестве примера на рис. 3.2 показана взаимосвязь мощности на валу вентиляторов с требуемым температурным перепадом на УОГ, число вентиляторов $N = 24$, мощность двигателя вентилятора $P_{\text{н}} = 20$ кВт.

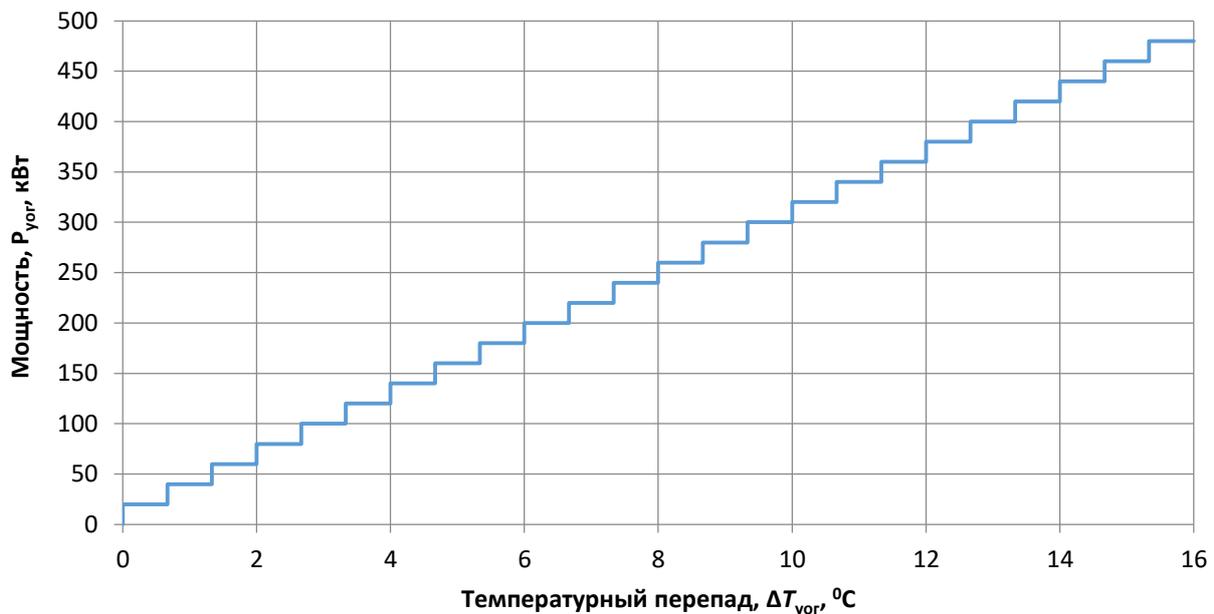


Рис. 3.2. Зависимость мощности электродвигателей вентиляторов от требуемого температурного перепада при дискретном регулировании

Контрольные вопросы

1. От чего зависит температурный перепад на АВО?
2. За счет чего регулируется температурный перепад на установке охлаждения газа при дискретном управлении?
3. Поясните, как реализуется дискретное управление, а также укажите его недостатки.
4. Как зависит мощность, потребляемая на охлаждение, от требуемого температурного перепада?

3.2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Задание № 3.1

1. Для исходных данных, приведенных в табл. 3.1, используя номограмму рис. 3.2, определите температурный перепад на АВО для двух ΔT_2 и одного ΔT_1 включенного вентилятора.

2. Рассчитайте в именованных единицах и постройте график взаимосвязи температурного перепада на УОГ, числа включенных вентиляторов и мощности двигателей вентиляторов.

Методические указания. Для выполнения задания 3.1 за независимую переменную примите $\Delta T_{\text{уог}}$. По выражению (3.2) найдите $\Delta T_{\text{уог}1}$ при одном включенном вентиляторе ($m = 1$) и задайте по оси абсцисс шаг, равный $\Delta T_{\text{уог}1}$. При изменении значений по оси абсцисс на один шаг мощность в соответствии с выражением (3.3) увеличивается на $P_{\text{н}}$.

Таблица 3.1

№ варианта	$P_{\text{н}}$, кВт	N	t_1 , °C	τ_1 , °C	G , кг/с
1	37	24	35	0	40
2	37	12	40	-10	50
3	37	16	45	-5	60
4	37	18	35	-20	70
5	37	20	40	-15	80
6	37	8	35	5	90
7	37	12	40	5	100

Часть таблицы расчетных данных приведена ниже (табл. 3.2). Обратите внимание – для построения ступенчатой диаграммы приходится дважды задавать одно и то же значение аргумента, так как при одном и том же значении аргумента функция имеет два значения.

Таблица 3.2

$\Delta T_{\text{гор}}, ^\circ\text{C}$	$P, \text{кВт}$
0,00	0
0,00	20
0,67	20
0,67	40
1,33	40
1,33	60

Содержание отчета

1. Краткая теория.
2. Задание на выполнение исследования.
3. Результаты расчетов и график.

4. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВОК ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА ПРИ ДИСКРЕТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ

4.1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Для управления электродвигателями аппаратов воздушного охлаждения газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов наиболее широко используются дискретные алгоритмы управления. Требуется исследовать возможность оптимизации алгоритма и оценить его эффективность.

Технологическая схема типовой установки охлаждения газа состоит из нескольких АВО, параллельно соединенных между собой.

Теплообменник представляет собой пучок оребренных труб, через который прокачивается охлаждаемый газ. Для увеличения интенсивности охлаждения теплообменник с помощью вентиляторов обдувается наружным воздухом. В типовом АВО устанавливаются два вентилятора, каждый из которых обдувает соответствующую секцию (часть) теплообменника.

Каждая часть теплообменника АВО в стационарном режиме обеспечивает определенное снижение (перепад) температуры. Перепад температуры в частях теплообменника зависит при постоянной частоте вращения двигателя вентилятора, температуры газа на входе в теплообменник, температуры наружного воздуха, расхода газа через АВО, технического состояния (засоренности) теплообменника и электродвигателей.

Задача управления установкой охлаждения заключается в том, чтобы обеспечить требуемое снижение температуры газа (температурный перепад) на установке охлаждения, т. е. снизить температуру газа на определенную величину.

При дискретном регулировании температуры газа включение одного вентилятора дает на выходе АВО некоторый температурный перепад ΔT_i .

Общий температурный перепад на выходе УОГ при допущении о равномерном распределении потока газа по аппаратам воздушного

охлаждения и равенстве глубины охлаждения на каждом аппарате определяется соотношением

$$\Delta T_{\text{уог}} = \frac{m}{N_{\text{аво}}} \Delta T_1,$$

где $N_{\text{аво}}$ – количество аппаратов воздушного охлаждения в составе УОГ;
 m – число включенных вентиляторов.

Учитывая, что $N_{\text{аво}} = N/2$, где N – общее число вентиляторов, можно записать

$$\Delta T_{\text{уог}} = 2 \frac{m}{N} \Delta T_1. \quad (4.1)$$

Очевидно, что число включенных вентиляторов нужно выбирать так, чтобы общий температурный перепад был не меньше требуемого

$$\Delta T_{\text{уог}} \geq \Delta T_{\text{тр}}. \quad (4.2)$$

Решение задачи осложняется тем, что перепады температуры ΔT_i при включении отдельных вентиляторов не одинаковы. Это объясняется замятостью ребер отдельных теплообменников, их засоренностью и др. Кроме того, мощность P_i , потребляемая двигателями отдельных вентиляторов, также не одинакова. Причинами отличия мощностей является неидентичность характеристик двигателей, неодинаковые углы атаки лопастей вентиляторов, изменение аэродинамического сопротивления теплообменников из-за их засоренности и др.

В связи с этим возникает задача – включать определенные вентиляторы так, чтобы потребление электроэнергии было минимально возможным для данных условий [1].

Формализуем постановку задачи.

Из множества альтернативных вариантов включения вентиляторов необходимо выбрать вариант (варианты), обеспечивающий минимум мощности включенных вентиляторов:

$$\sum_{i=1}^m P_i \rightarrow \min, \quad (4.3)$$

при выполнении требований технологического задания (4.2).

Поставленная задача относится к классу задач дискретной оптимизации. С учетом ее специфических особенностей предлагается использовать следующий метод решения. Введем дополнительный показатель – коэффициент эффективности вентилятора, определив его в виде

$$K_{\text{эфф}i} = \frac{\Delta T_i}{P_i}. \quad (4.4)$$

Очевидно, что чем больше коэффициент эффективности вентилятора, тем меньшая мощность требуется для создания определенного температурного перепада. Следовательно, при оптимальном управлении в первую очередь нужно включать вентиляторы, имеющие наибольший коэффициент эффективности.

Рассмотрим упрощенную задачу – требуется найти последовательность включения двигателей вентиляторов в порядке убывания коэффициента эффективности.

Контрольные вопросы

1. Как зависит температурный перепад на УОГ от числа включенных вентиляторов?
2. Что показывает коэффициент эффективности вентилятора?
3. Чем вызвано отличие коэффициентов эффективности отдельных вентиляторов?
4. Как ставится задача оптимизации при дискретном регулировании?

4.2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Задание № 4.1

1. С учетом исходных данных, приведенных в табл. 4.1, провести оптимизацию алгоритма включения двигателей вентиляторов установки охлаждения газа.

2. Для оценки эффективности оптимизации рассчитать мощность для случая, когда вентиляторы включаются последовательно, в соответствии с их номерами в исходном массиве, без учета коэффициента эффективности.

3. Построить графики зависимости мощности от числа включенных вентиляторов: при оптимальном выборе варианта включения и при включении по номерам вентиляторов.

В табл. 4.1 обозначено:

i – номер вентилятора (электродвигателя);

ΔT_i – температурный перепад, создаваемый на АВО при включении i -того вентилятора, °С;

P_i – мощность i -того электродвигателя, кВт.

Таблица 4.1

Вариант 1			Вариант 2			Вариант 3			Вариант 4			Вариант 5		
i	ΔT_i , °С	P_i , кВт	i	ΔT_i , °С	P_i , кВт	i	ΔT_i , °С	P_i , кВт	i	ΔT_i , °С	P_i , кВт	i	ΔT_i , °С	P_i , кВт
1	14	37	1	19	37	1	26	37	1	14	30	1	24	37
2	20	36	2	17	36	2	15	32	2	25	36	2	15	36
3	21	38	3	22	38	3	19	30	3	18	38	3	28	38
4	19	30	4	19	39	4	19	39	4	19	39	4	20	39
5	12	35	5	12	35	5	10	35	5	22	35	5	14	30
6	16	37	6	16	39	6	16	37	6	16	37	6	16	37
7	19	33	7	19	33	7	19	33	7	19	35	7	19	33
8	24	34	8	24	34	8	21	34	8	24	34	8	26	34
9	23	35	9	23	30	9	23	30	9	23	30	9	23	30
10	26	31	10	26	38	10	20	31	10	26	31	10	22	31

Пример расчета. Поиск *оптимального варианта* решения с использованием электронных таблиц *Excel* поясняет табл. 4.2. В столбцах В и С табл. 4.2 приведены исходные данные по перепаду температуры и мощности для каждого из 10 вентиляторов. В столбце D рассчитаны по формуле (4.4) значения $K_{эффi}$ для каждого вентилятора.

В столбце E (см. табл. 4.2) с использованием функции **НАИБОЛЬШИЙ** проведено упорядочение (ранжирование) значений $K_{эфф}$ в порядке убывания.

Задавать функции в XL можно, используя окно функции или записывая соответствующее выражение в ячейке.

Запись непосредственно в ячейке E2 имеет вид:

=НАИБОЛЬШИЙ(\$D\$2:\$D\$11;A1)

При использовании окна (рис. 4.1) необходимо записать:

в строке **Массив** \$D\$2:\$D\$11

в строке **КА**1.

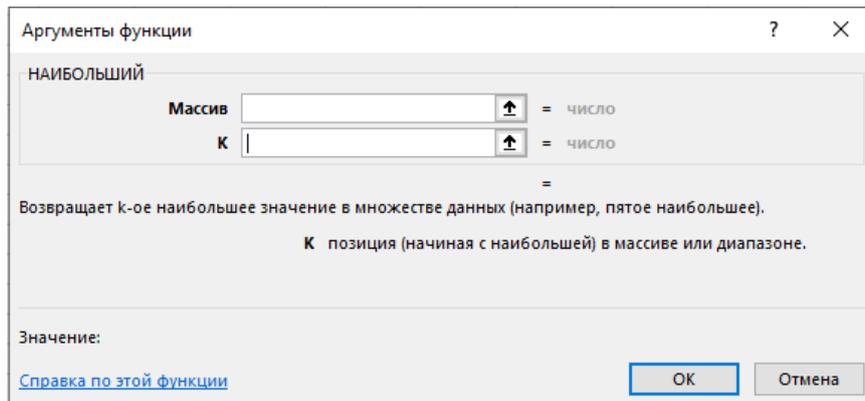


Рис. 4.1. Синтаксис функции НАИБОЛЬШИЙ

В результате в ячейке E2 будет получено первое ($A1 = 1$) наибольшее значение среди данных столбца D.

Далее формулу можно копировать по ячейкам столбца D. Значение A1 будет изменяться и в последующих ячейках будут получены второе, третье и т. д. по величине значения $K_{эффi}$.

Чтобы «привязать» номер вентилятора к ранжированным значениям $K_{эффi}$, в ячейках столбца F использована функция ПОИСКПОЗ (рис. 4.2).

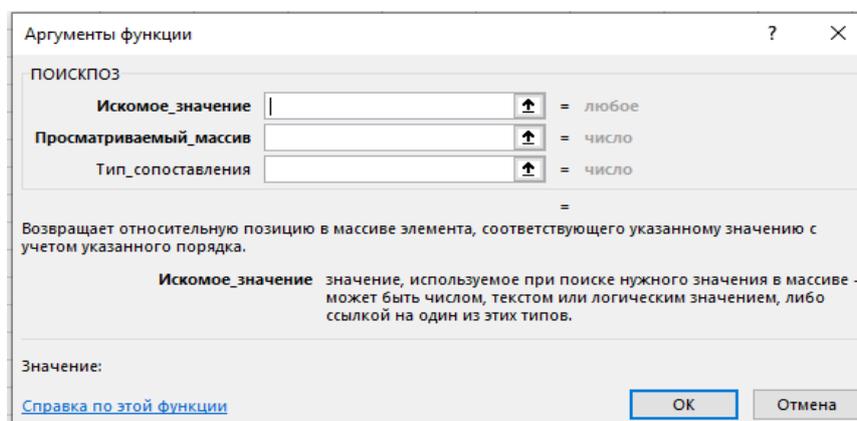


Рис. 4.2. Синтаксис функции ПОИСКПОЗ

Формула в ячейке F2 имеет вид:

=ПОИСКПОЗ(E2; \$D\$2:\$D\$11;0)

При использовании окна запись имеет вид:

В строке **Искомое значение** записано E2.

В строке **Просматриваемый массив** \$D\$2:\$D\$11.

В строке **Тип сопоставления** 0.

Далее формулу можно копировать по ячейкам столбца F.

В результате в столбце F получены номера вентиляторов, соответствующие ранжированным значениям $K_{эффi}$. Так, например, наибольшему значению $K_{эффi} = 0,84$ (строка 2) соответствует 10-я позиция в исходном массиве, т. е. вентилятор № 10. Значению $K_{эфф} = 0,77$ соответствует вентилятор № 9 и т. д.

Таким образом, номера вентиляторов в столбце F указывают очередность их включения при оптимальном управлении: № 10, № 9, № 8, № 7, № 4, № 3, № 6, № 2, № 1, № 5.

На следующем этапе в ячейках столбца G определены мощности $P_{i\text{позиц}}$ двигателей в соответствии с их позициями (столбец F).

Для этого использована функция ИНДЕКС (рис. 4.3).

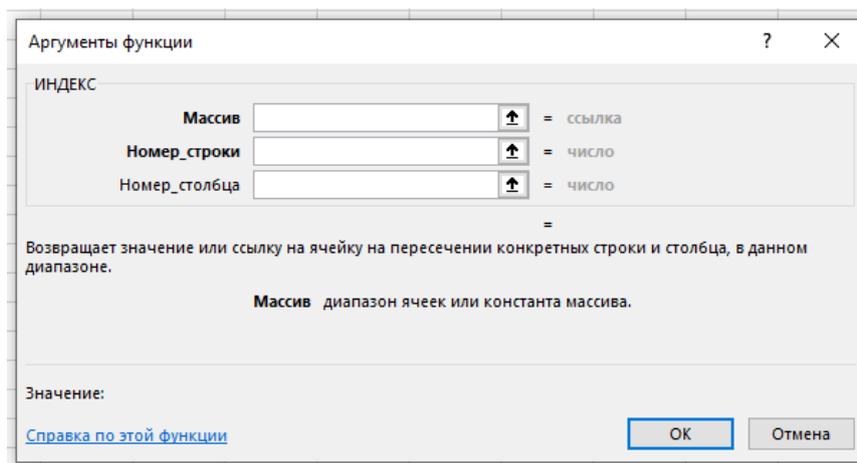


Рис. 4.3. Синтаксис функции ИНДЕКС

Формула непосредственно в ячейке G2:

=ИНДЕКС(\$C\$2:\$C\$11;F2)

В окне функции для ячейки G2 запись имеет вид:

в строке **Массив** записано \$C\$2: \$C\$11

в строке **Номер строки** F2

в строке **Номер столбца** запись не используется.

Далее формулу можно копировать по ячейкам столбца.

Таблица 4.2

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	№ вент. <i>i</i>	ΔT_i , °C	P_i , кВт	$K_{эффi}$	$K_{эффi}$ ранж.	ПОЗИЦ	$P_{i\text{позиц}}$, кВт	$P_{\text{уог.опт}}$, кВт	$P_{\text{уог}}$, кВт	ΔP , кВт
2	1	14	37	0,38	0,84	10	31	31	37	6
3	2	15	36	0,42	0,77	9	30	61	69	12
4	3	18	38	0,47	0,71	8	34	95	107	16
5	4	19	39	0,49	0,58	7	33	128	146	22
6	5	12	35	0,34	0,49	4	39	167	181	18
7	6	16	37	0,43	0,47	3	38	205	218	17
8	7	19	33	0,58	0,43	6	32	237	251	13
9	8	24	34	0,71	0,42	2	37	274	285	11
10	9	23	30	0,77	0,38	1	37	311	315	4
11	10	26	31	0,84	0,34	5	35	346	346	0

Далее рассчитываем значение суммарной мощности $P_{\text{уог.опт}}$ (столбец H) при включении вентиляторов в *оптимальной последовательности*.

При включении одного вентилятора № 10 мощность УОГ будет равна мощности двигателя вентилятора № 10 (ячейка G2) $P_{\text{уог.опт}} = 31$ кВт.

В ячейке H2 запись = G2.

При включении следующего вентилятора № 9 мощность увеличится на 30 кВт (ячейка G3). В ячейке H3 формула = H2 + G3. Далее по столбцу H формулу можно скопировать.

Для расчета мощности $P_{\text{уог}}$ в случае *включения вентиляторов в порядке их номеров* в ячейке I2 записываем =C2. В ячейке I3 записываем = I2 + C3. Далее по столбцу формулу можно скопировать.

По полученным данным строим зависимость мощности двигателей вентиляторов от числа включенных вентиляторов для оптимального алгоритма и включения их в порядке номеров вентиляторов (рис. 4.4).

В столбце J (см. табл. 4.2) рассчитана экономия мощности за счет оптимизации алгоритма включения вентиляторов:

$$\Delta P = P_{\text{уог}} - P_{\text{уог.опт.}}$$

Соответствующий график построен на рис. 4.5.

Проанализируйте полученные результаты.

В задании рассмотрен упрощенный метод оценки эффективности оптимизации алгоритма дискретного управления двигателями вентиляторов УОГ. Для более полной оценки следует дополнительно рассматривать температурный перепад, создаваемый установкой при оптимальном алгоритме управления [1].

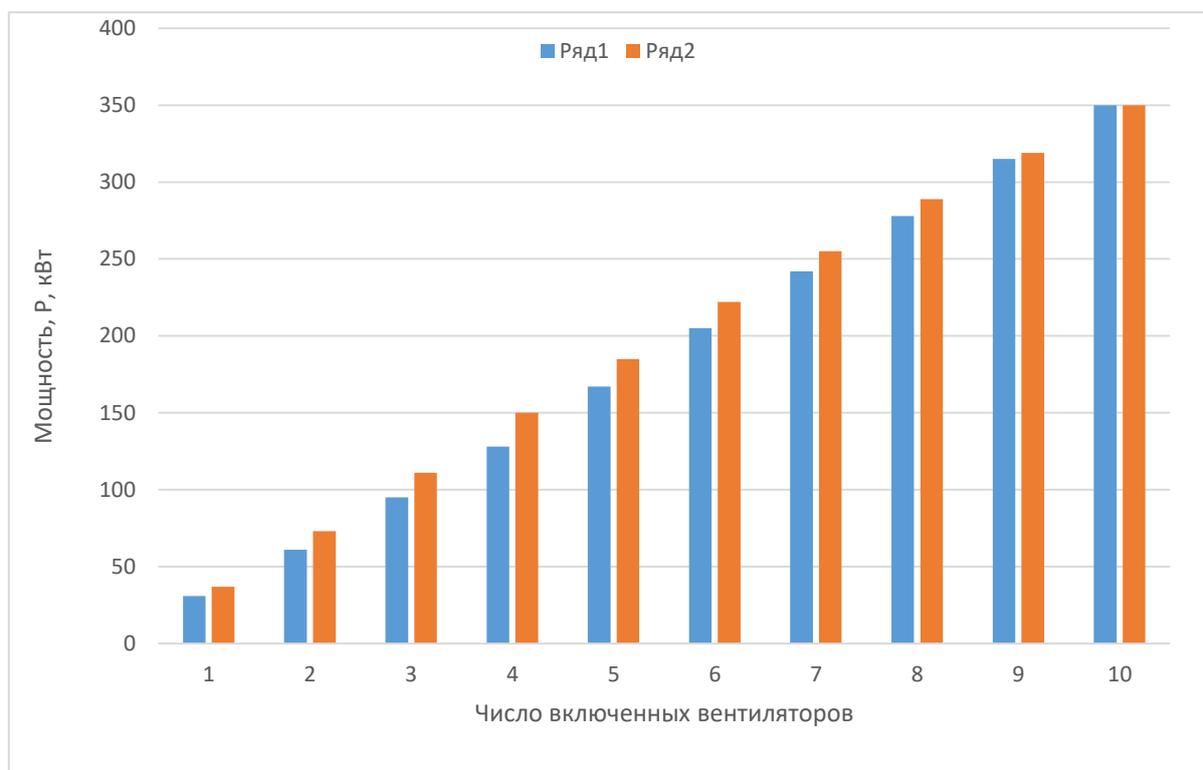


Рис. 4.4. Зависимость мощности двигателей вентиляторов

от числа включенных вентиляторов:

ряд 1 – при оптимальном алгоритме;

ряд 2 – при включении в порядке номеров

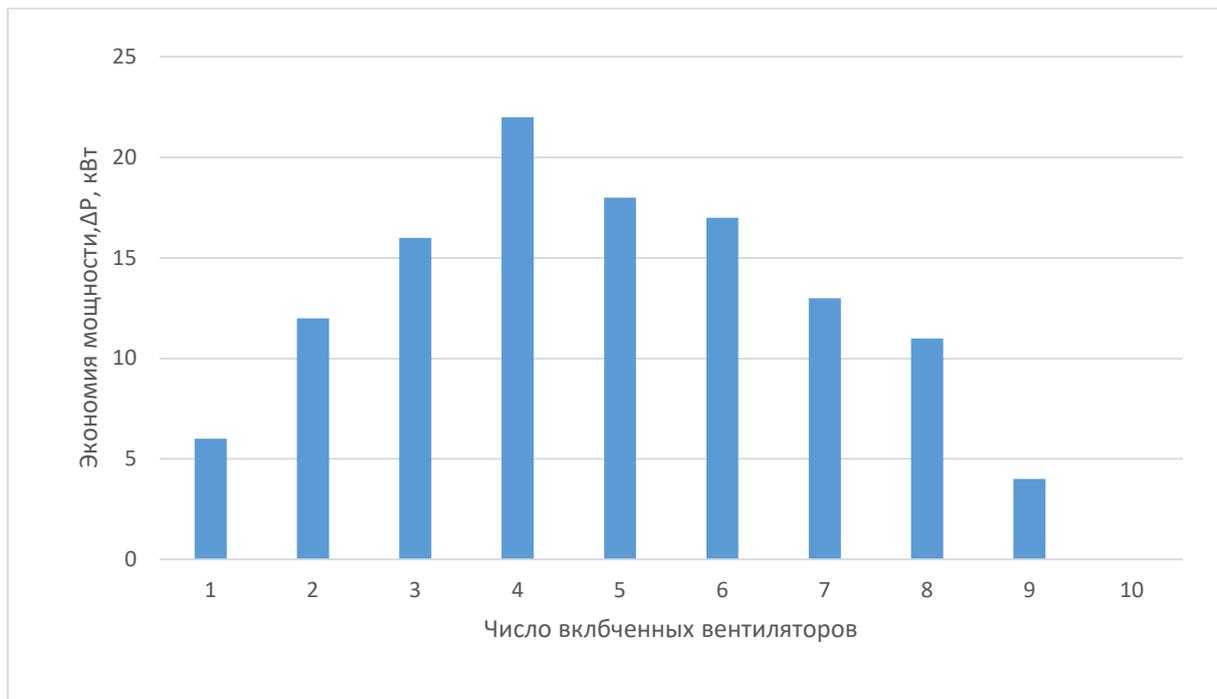


Рис. 4.5. Экономия мощности за счет оптимизации алгоритма управления

Содержание отчета

1. Краткая теория.
2. Задание на выполнение исследования.
3. Разработка программы, расчеты и графики.
4. Выводы по работе.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВодОВ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

5.1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Как уже обсуждалось в предыдущих разделах, задача управления установкой охлаждения заключается в том, чтобы обеспечить требуемое снижение температуры газа (температурный перепад) $\Delta T_{\text{уог}}$ на установке охлаждения, т. е. снизить температуру газа на определенную требуемую величину $\Delta T_{\text{тр}}$:

$$\Delta T_{\text{уог}} \geq \Delta T_{\text{тр}}.$$

Температурный перепад на АВО регулируется либо дискретно (включением/отключением вентиляторов), либо непрерывно – изменением частоты вращения вентиляторов, приводимых в движение асинхронными короткозамкнутыми двигателями. В последнем случае используется частотно-регулируемый электропривод (ЧРП).

При низкой температуре наружного воздуха при дискретном регулировании часть двигателей вентиляторов можно отключить, а при плавном регулировании снизить частоту вращения двигателей. За счет этого уменьшается мощность на валу двигателей и мощность, потребляемая из сети, т. е. снижается расход электроэнергии. Методика расчета мощности на валу электродвигателей вентиляторов в случае дискретного регулирования приведена в предыдущих работах.

Рассмотрим особенности определения необходимой на охлаждение мощности при непрерывном (частотном) одновременном (синхронном) регулировании скорости всех вентиляторов. В результате исследований установлено [6–11], что перепад температуры на АВО линейно зависит от частоты n вращения вентиляторов. Соответственно, в случае одновременного регулирования скорости всех вентиляторов перепад температуры на установке охлаждения в целом определяется скоростью вентиляторов:

$$\Delta T_{\text{уог}} = \Delta T_{\text{max}} \left(\frac{n}{n_{\text{ном}}} \right),$$

где T_{max} – максимальный температурный перепад на установке охлаждения при работе всех вентиляторов с номинальной частотой вращения $n_{ном}$.

Отсюда

$$\frac{\Delta T_{уог}}{\Delta T_{max}} = \left(\frac{n}{n_{ном}} \right). \quad (5.1)$$

Таким образом, относительный температурный перепад $\frac{\Delta T_{уог}}{\Delta T_{max}}$ на УОГ равен относительной скорости вентиляторов.

Особенностью вентиляторов, центробежных насосов, компрессоров является то, что мощность на валу таких механизмов зависит от относительной *скорости вращения в третьей степени*:

$$P = P_{ном} \left(\frac{n}{n_{ном}} \right)^3, \quad (5.2)$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность электродвигателя вентилятора.

Учитывая (5.1), (5.2), зависимость мощности на валу двигателей вентиляторов установки охлаждения от требуемого относительного перепада температуры при частотном регулировании можно представить в виде:

$$P_{чрп} = NP_{ном} \left(\frac{\Delta T_{уог}}{\Delta T_{max}} \right)^3, \quad (5.3)$$

где N – число вентиляторов,

$\Delta T_{уог} = \Delta T_{тр}$ – требуемый температурный перепад.

Проанализируем выражение (5.1). Из него следует, что если, например, требуемый температурный перепад в 2 раза меньше максимального, то частоту вращения вентиляторов можно снизить в 2 раза. При этом в соответствии с (5.3) мощность на валу вентиляторов снизится в $2^3 = 8$ раз.

В случае дискретного регулирования в тех же условиях можно отключить половину вентиляторов, при этом мощность снизится

только в 2 раза. В результате при использовании ЧРП достигается значительная экономия мощности и электроэнергии по сравнению с дискретным регулированием.

Построим зависимости мощности от температурного перепада при дискретном управлении и при использовании ЧРП.

Детальный график мощности при дискретном управлении рассмотрен в задании № 3.1. Здесь заменим его приближенным, рассчитанным по выражению

$$P_{\text{дискр}} = NP_{\text{ном}} \frac{\Delta T_{\text{уог}}}{\Delta T_{\text{max}}}. \quad (5.4)$$

Взаимосвязь требуемой мощности на валу электродвигателей УОГ с температурным перепадом при дискретном и частотном регулировании показана на рис. 5.1.

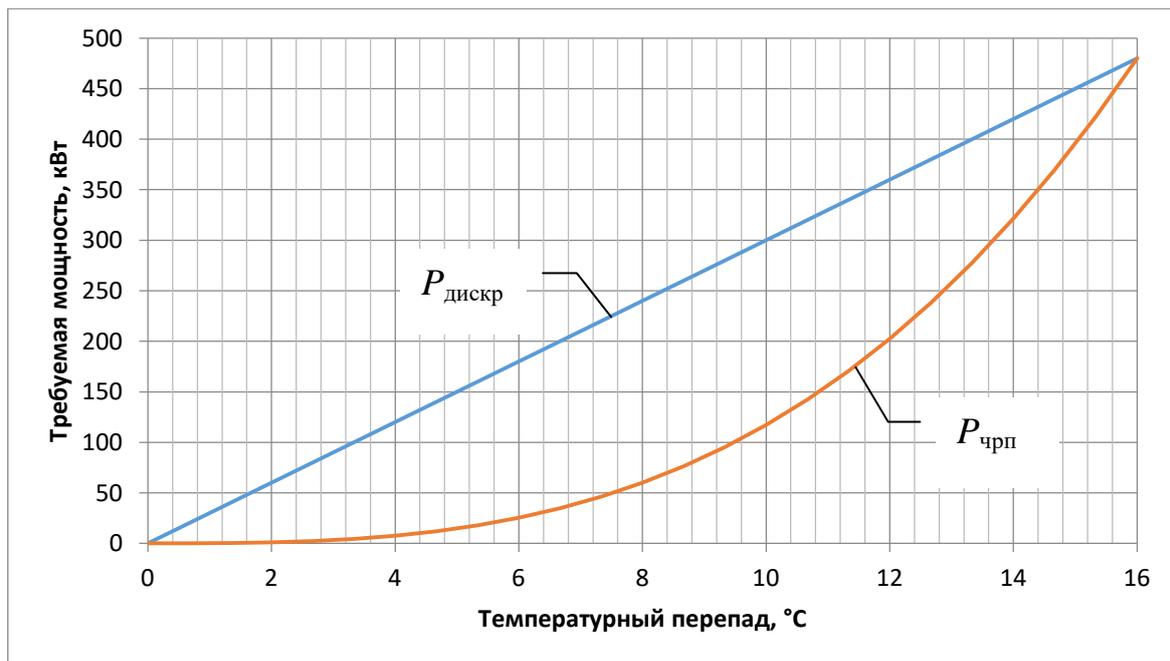


Рис. 5.1. Зависимость мощности на валу электродвигателей вентиляторов УОГ от требуемого перепада температуры $\Delta T_{\text{тр}}$

Экономия мощности при использовании ЧРП определяется как разность ординат приведенных графиков:

$$\Delta P = P_{\text{дискр}} - P_{\text{чрп}}. \quad (5.5)$$

Соответствующий график приведен на рис. 5.2.

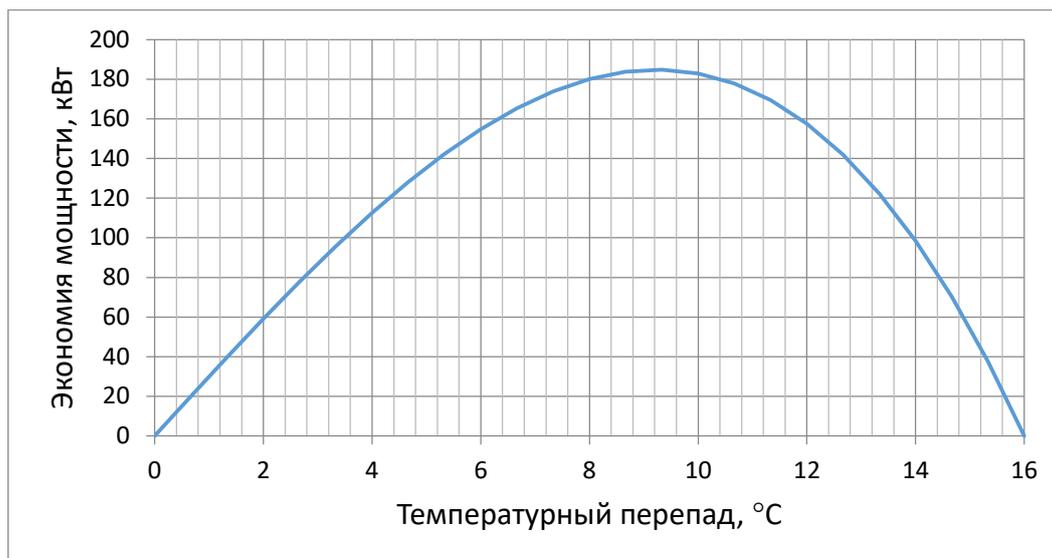


Рис. 5.2. Зависимость экономии мощности от требуемого температурного перепада

Контрольные вопросы

1. Как зависит мощность, потребляемая на охлаждение, от требуемого температурного перепада при дискретном регулировании?
2. Как зависит мощность, потребляемая на охлаждение, от требуемого температурного перепада при частотном регулировании?
3. Какова максимальная экономия мощности и при каком температурном перепаде она достигается?

5.2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Задание № 5.1

Требуется оценить экономию мощности при использовании частотного регулирования скорости вентиляторов АВО взамен дискретного.

1. Для исходных данных, приведенных в табл. 5.1, рассчитайте по выражению (5.4) зависимость требуемой мощности на валу двигателей вентиляторов установки охлаждения газа при дискретном регулировании в функции требуемого температурного перепада.

2. Рассчитайте зависимость мощности на валу двигателей от требуемого температурного перепада при использовании ЧРП (выражение (5.3)). Постройте графики указанных зависимостей.

Таблица 5.1

№ варианта	К-во двигателей, N	$P_{\text{ном}}$, кВт	ΔT_{max} , °C
1	24	37	16
2	16	37	18
3	12	37	20
4	26	37	22
5	28	37	18
6	32	37	17
7	32	30	15
8	24	40	19
9	30	40	21
10	24	45	19

3. Рассчитайте по выражению (5.5) зависимость экономии мощности от требуемого температурного перепада на УОГ, постройте соответствующий график. Определите максимум экономии мощности в кВт.

Пример расчета. В табл. 5.2 приведен пример расчета для $\Delta T_{\text{max}} = 16$ °C и $NP_{\text{ном}} = 480$ кВт. Соответствующие графики показаны на рис. 5.1, рис. 5.2.

Таблица 5.2

$\Delta T_{\text{уог}}$, °C	$\Delta T_{\text{уог}} / \Delta T_{\text{max}}$	$P_{\text{дискр}}$, кВт	$P_{\text{чрп}}$, кВт	ΔP , кВт
0	0	0	0	0
1	0,062	30	0	30
2	0,125	60	1	59
3	0,187	90	3	87
4	0,250	120	8	113
5	0,312	150	15	135
6	0,375	180	25	155
7	0,437	210	40	170
8	0,500	240	60	180
9	0,562	270	85	185
10	0,625	300	117	183

$\Delta T_{\text{уог}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{уог}} / \Delta T_{\text{max}}$	$P_{\text{дискр}}, \text{кВт}$	$P_{\text{чрп}}, \text{кВт}$	$\Delta P, \text{кВт}$
11	0,687	330	156	174
12	0,750	360	203	158
13	0,812	390	257	133
14	0,875	420	322	98
15	0,937	450	396	54
16	1,000	480	480	0

Содержание отчета

1. Краткая теория.
2. Задание на выполнение исследования.
3. Расчетная таблица и графики.
4. Выводы по работе.

6. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВОК ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ ВЕНТИЛЯТОРОВ

6.1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Для управления электродвигателями аппаратов воздушного охлаждения газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов находит все большее применение частотно-регулируемый привод вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения.

Технологическая схема типовой установки охлаждения газа состоит из нескольких АВО, параллельно соединенных между собой.

Температура газа $T_{\text{вых}}$ на выходе установки определяется температурой газа $T_{\text{вх}}$ на входе и температурным перепадом $\Delta T_{\text{уог}}$ (снижением температуры) на УОГ:

$$T_{\text{вых}} = T_{\text{вх}} - \Delta T_{\text{уог}}. \quad (6.1)$$

Чтобы обеспечить требуемое значение температуры газа на выходе, установка охлаждения должна создавать температурный перепад, равный требуемому:

$$\Delta T_{\text{уог}} = \Delta T_{\text{тр}}. \quad (6.2)$$

Для выполнения условия (6.2) при дискретном регулировании управляют числом включенных вентиляторов, а при частотном регулировании изменяют скорость вентиляторов.

В предыдущем разделе при анализе эффективности частотного регулирования предполагалось, что все АВО обладают одинаковыми характеристиками. В этом случае вентиляторам всех АВО задается одна и та же скорость. Предполагалось также, что мощности на их валу равны, и одинаковы перепады температуры на АВО.

Однако в реальной ситуации перепады температуры и мощности на валу вентиляторов отдельных АВО существенно отличаются [1, 12, 13]. Это объясняется замятостью ребер отдельных теплообменников, их засоренностью и др. Причинами отличия мощностей являются

неидентичность характеристик двигателей, неодинаковые углы атаки лопастей вентиляторов, изменение аэродинамического сопротивления теплообменников из-за их засоренности и др.

В связи с этим возникает задача нахождения оптимальных значений скорости вентиляторов отдельных АВО, при которых их суммарная мощность будет минимальной [1].

Для упрощения будем считать, что установка состоит из двух АВО (рис. 6.1). Каждый АВО в стационарном режиме при номинальной частоте вращения $n_{\text{НОМ}}$ вентилятора (вентиляторов) обеспечивает определенное снижение (перепад) температуры ΔT_{0i} . Температурный перепад на УОГ при допущении о равномерном распределении потока газа по аппаратам воздушного охлаждения составит

$$\Delta T_{0\text{УОГ}} = \frac{1}{2} (\Delta T_{01} + \Delta T_{02}), \quad (6.3)$$

где ΔT_{01} и ΔT_{02} – температурные перепады на первом и втором АВО в определенных условиях при номинальной частоте вращения $n_{\text{НОМ}}$ вентиляторов.

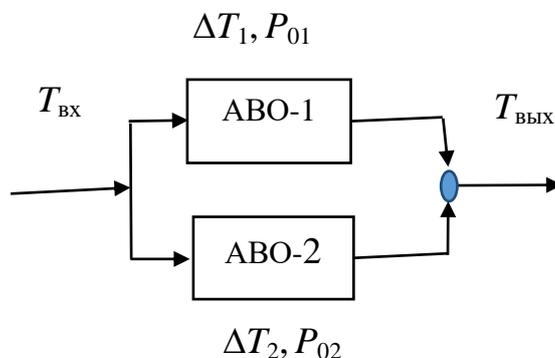


Рис. 6.1. Схема установки охлаждения

Энергетическую эффективность каждого АВО будем характеризовать коэффициентом эффективности – отношением температурного перепада ΔT_{0i} к мощности P_{0i} на валу вентилятора при номинальной скорости:

$$k_{\text{эф}i} = \frac{\Delta T_{0i}}{P_{0i}}. \quad (6.4)$$

Очевидно, что чем больше коэффициент эффективности АВО, тем меньшая мощность требуется для создания определенного температурного перепада.

На основании экспериментальных данных установлено, что эффективность отдельных АВО может отличаться более чем в два раза.

Определение оптимальных значений скорости вентиляторов. Разработаем математическую модель для решения задачи оптимизации.

За критерий оптимизации (целевую функцию) примем суммарную мощность на валу вентиляторов УОГ. В предыдущем разделе пояснялось, что мощность на валу вентилятора при регулировании скорости пропорциональна кубу относительной скорости. Обозначим относительную скорость

$$\frac{n_i}{n_{\text{ном}}} = v_i. \quad (6.5)$$

Тогда зависимость мощности i -того вентилятора от скорости можно представить в виде:

$$P_i(v_i) = P_{0i}v_i^3,$$

где P_{0i} – мощность на валу i -того вентилятора при номинальной скорости.

Для двух вентиляторов суммарная мощность будет:

$$P_{\Sigma}(v_1, v_2) = P_{01}v_1^3 + P_{02}v_2^3. \quad (6.6)$$

Задача оптимизации:

$$P_{\Sigma}(v_1, v_2) \rightarrow \min.$$

Температурный перепад на АВО, как уже обсуждалось, при непрерывном регулировании зависит от скорости в первой степени. Уравнение (6.3) в этом случае принимает вид:

$$\Delta T_{\text{УОГ}}(v_1, v_2) = 0,5\Delta T_{01}v_1 + 0,5\Delta T_{02}v_2. \quad (6.7)$$

За счет регулирования скорости необходимо обеспечить температурный перепад, равный требуемому:

$$0,5\Delta T_{01}v_1 + 0,5\Delta T_{02}v_2 = \Delta T_{\text{тр}}. \quad (6.8)$$

Перепишем последнее условие в виде:

$$g(v_1, v_2) = 0,5\Delta T_{01}v_1 + 0,5\Delta T_{02}v_2 - \Delta T_{\text{тр}} = 0. \quad (6.9)$$

Рассматриваемую задачу можно характеризовать как однокритериальную оптимизационную задачу с двумя параметрами проектирования (управляющими воздействиями) v_1, v_2 . Для ее решения используем метод неопределенных множителей Лагранжа. Функция Лагранжа записывается в виде суммы критерия (6.6) и уравнения связи (6.9), умноженного на неопределенный множитель λ :

$$\begin{aligned} L(v_1, v_2, \lambda) &= P_{\Sigma}(v_1, v_2) + \lambda g(v_1, v_2) = \\ &= P_{01}v_1^3 + P_{02}v_2^3 + \lambda(0,5\Delta T_{01}v_1 + 0,5\Delta T_{02}v_2 - \Delta T_{\text{тр}}). \end{aligned} \quad (6.10)$$

Находим частные производные от функции Лагранжа и приравняем их нулю:

$$\frac{\partial L(v_1, v_2, \lambda)}{\partial v_1} = 3P_{01}v_1^2 + \frac{\lambda}{2}\Delta T_{01} = 0; \quad (6.11)$$

$$\frac{\partial L(v_1, v_2, \lambda)}{\partial v_2} = 3P_{02}v_2^2 + \frac{\lambda}{2}\Delta T_{02} = 0; \quad (6.12)$$

$$\frac{\partial L(v_1, v_2, \lambda)}{\partial \lambda} = 0,5\Delta T_{01}v_1 + 0,5\Delta T_{02}v_2 - \Delta T_{\text{тр}} = 0. \quad (6.13)$$

Из (6.11) находим

$$\lambda = -\frac{2 * 3P_{01}v_1^2}{\Delta T_{01}}$$

и подставляем в (6.12):

$$3P_{02}v_2^2 - \frac{2 \cdot 3P_{01}v_1^2}{2\Delta T_{01}} \Delta T_{02} = 0, \Rightarrow P_{02}v_2^2 = \frac{P_{01}v_1^2}{\Delta T_{01}} \Delta T_{02}, \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_2^2 = \frac{P_{01}}{\Delta T_{01}} \frac{\Delta T_{02}}{P_{02}} v_1^2.$$

С учетом принятого обозначения (6.4) последнее выражение можно представить в следующем виде:

$$v_2 = v_1 \sqrt{k_{\text{эф}2} / k_{\text{эф}1}}. \quad (6.14)$$

Подставив (6.14) для v_2 в (6.13), найдем оптимальное значение скорости v_1 :

$$0,5\Delta T_{01}v_1 + 0,5\Delta T_{02}v_1 \sqrt{k_{\text{эф}2} / k_{\text{эф}1}} - \Delta T_{\text{тр}} = 0, \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_{1opt} = \frac{2\Delta T_{\text{тр}}}{\Delta T_{01} + \Delta T_{02} \sqrt{k_{\text{эф}2} / k_{\text{эф}1}}}. \quad (6.15)$$

Значение v_{2opt} вычисляется подстановкой v_{1opt} в выражение (6.14). Оптимальное значение суммарной мощности вычисляют по выражению (6.6), подставляя в него найденные значения оптимальных скоростей v_{1opt}, v_{2opt} .

Оценим *насколько оптимальное решение лучше рационального*, не учитывающего индивидуальные характеристики АВО. В случае рационального управления скорости вентиляторов принимаются одинаковыми $v_1 = v_2 = v$ и рассчитываются из условия (6.8):

$$0,5\Delta T_{01}v_1 + 0,5\Delta T_{02}v_2 = \Delta T_{\text{тр}} \Rightarrow v = \frac{2\Delta T_{\text{тр}}}{\Delta T_{01} + \Delta T_{02}}. \quad (6.16)$$

При этом суммарная мощность будет

$$P_{\Sigma} = v^3(P_{01} + P_{02}). \quad (6.17)$$

Экономия мощности за счет оптимизации

$$\Delta P = \frac{P_{\Sigma} - P_{\Sigma\text{opt}}}{P_{\Sigma\text{opt}}} 100 \%. \quad (6.18)$$

Оценка чувствительности оптимального решения. Чтобы проверить правильность вычислений и оценить чувствительность оптимального решения, рассчитаем и построим график зависимости критерия оптимизации от отношения

$$\frac{v_1}{v_2} = b. \quad (6.19)$$

Необходимое значение скоростей вычисляется из условия (6.8):

$$0,5\Delta T_{01}v_1 + 0,5\Delta T_{02}v_2 = \Delta T_{\text{тр}}. \quad (6.20)$$

Используя (6.19), выразим v_2 через v_1 :

$$v_2 = \frac{v_1}{b} \quad (6.21)$$

и подставим в (6.20):

$$0,5\Delta T_{01}v_1 + 0,5\Delta T_{02}\frac{v_1}{b} = \Delta T_{\text{тр}}, \Rightarrow v_1 = \frac{2\Delta T_{\text{тр}}}{\Delta T_{01} + \Delta T_{02}/b}. \quad (6.22)$$

Значение суммарной мощности рассчитывается по (6.6).

Далее, задавшись диапазоном изменения b , рассчитываем зависимость $P_{\Sigma}(\frac{v_1}{v_2})$ и строим соответствующий график.

Контрольные вопросы

1. Что показывает коэффициент эффективности вентилятора?
2. Чем вызвано отличие коэффициентов эффективности отдельных вентиляторов?

3. Оцените эффективность оптимизации управления вентиляторами.
4. Оцените чувствительность критерия оптимизации к отклонению скоростей вентиляторов от оптимальных значений.

6.2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Задание № 6.1

Для исходных данных, приведенных в табл. 6.1, необходимо:

- 1) определить оптимальные значения скорости вентиляторов первого и второго АВО и оптимальное значение суммарной мощности;
- 2) исследовать зависимость суммарной мощности от отношения $\frac{v_1}{v_2}$.

Таблица 6.1

№ варианта	$\Delta T_{\text{тр}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{01}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{02}, ^\circ\text{C}$	$P_{01}, \text{кВт}$	$P_{02}, \text{кВт}$
1	14	22	18	55	78
2	13	20	17	48	70
3	12	18	14	45	68
4	8	16	10	52	60
5	10	15	12	50	70
6	11	18	12	55	68

Пример расчета. Исходные данные для расчета:

$$\Delta T_{\text{тр}} = 12 \text{ } ^\circ\text{C}, \Delta T_{01} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}, \Delta T_{02} = 15 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$P_{01} = 50 \text{ кВт}, P_{02} = 75 \text{ кВт}.$$

1. Расчет оптимальных значений скорости вентиляторов.

По формуле (6.4) рассчитываем коэффициенты эффективности:

$$k_{\text{эф1}} = \frac{\Delta T_{01}}{P_{01}} = \frac{20}{50} = 0,400 \frac{^\circ\text{C}}{\text{кВт}}; \quad k_{\text{эф2}} = \frac{\Delta T_{02}}{P_{02}} = \frac{15}{75} = 0,200 \frac{^\circ\text{C}}{\text{кВт}}.$$

По формуле (6.15) вычисляем оптимальное значение относительной скорости вентилятора первого АВО:

$$v_{1opt} = \frac{2\Delta T_{\text{тр}}}{\Delta T_{01} + \Delta T_{02} \sqrt{k_{\text{эф2}}/k_{\text{эф1}}}} = \frac{2 * 12}{20 + 16 \sqrt{0,20/0,40}} = 0,784.$$

По выражению (6.14) находим оптимальное значение относительной скорости вентилятора второго АВО:

$$v_{2opt} = v_{1opt} \sqrt{k_{\varepsilon\phi 2} / k_{\varepsilon\phi 1}} = 0,784 \sqrt{0,20 / 0,40} = 0,554.$$

Подставляем в (6.6) найденные оптимальные значения скоростей и вычисляем оптимальное значение суммарной мощности:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma opt}(v_{1opt}, v_{2opt}) &= P_{01} v_{1opt}^3 + P_{02} v_{2opt}^3 = \\ &= 50 * 0,784^3 + 75 * 0,554^3 = 36,9 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

В случае *рационального управления* скорости вентиляторов первого и второго АВО принимаются одинаковыми $v_1 = v_2 = v$ и рассчитываются по (6.16):

$$0,5\Delta T_{01} v_1 + 0,5\Delta T_{02} v_2 = \Delta T_{\text{тр}} \Rightarrow v = \frac{2\Delta T_{\text{тр}}}{\Delta T_{01} + \Delta T_{02}} = \frac{2 * 12}{20 + 15} = 0,686.$$

При этом суммарная мощность составит

$$P_{\Sigma} = v^3 (P_{01} + P_{02}) = 0,686^3 (50 + 75) = 40,3 \text{ кВт.}$$

Экономия мощности за счет оптимизации по выражению (6.18):

$$\Delta P = \frac{P_{\Sigma} - P_{\Sigma opt}}{P_{\Sigma opt}} 100 \% = \frac{40,3 - 36,9}{36,9} 100 \% = 9,24 \%.$$

2. Исследование зависимости суммарной мощности от отношения скоростей $\frac{v_1}{v_2}$.

Задаемся значениями $\frac{v_1}{v_2} = b$, и рассчитываем по выражению (6.22) значения v_1 , по (6.21) v_2 и по (6.17) суммарную мощность. Принимаем начальное значение $b = 1$ – это соответствует одинаковым скоростям вентиляторов, т. е. рациональному управлению. Конечное значение b принимаем больше, чем при оптимальном управлении. В рассматриваемом примере $\frac{v_{1opt}}{v_{2opt}} = \frac{0,784}{0,554} = 1,41$, конечное значение b принято 1,6 (табл. 6.2).

По результатам расчетов на рис. 6.2 построена зависимость $P_{\Sigma}(b)$.

Таблица 6.2

$b = \frac{v_1}{v_2}$	v_1	v_2	$P_{\Sigma}, \text{кВт}$
1,00	0,686	0,686	40,30
1,05	0,700	0,667	39,37
1,10	0,714	0,649	38,63
1,15	0,726	0,632	38,05
1,20	0,738	0,615	37,61
1,25	0,750	0,600	37,29
1,30	0,761	0,585	37,08
1,35	0,771	0,571	36,95
1,40	0,781	0,558	36,90
1,45	0,791	0,545	36,91
1,50	0,800	0,533	36,98
1,55	0,809	0,522	37,10
1,60	0,817	0,511	37,26

Как следует из таблицы и графика, минимум критерия оптимизации – мощности на валу вентиляторов достигается при рассчитанных выше значениях, что подтверждает правильность расчетов.

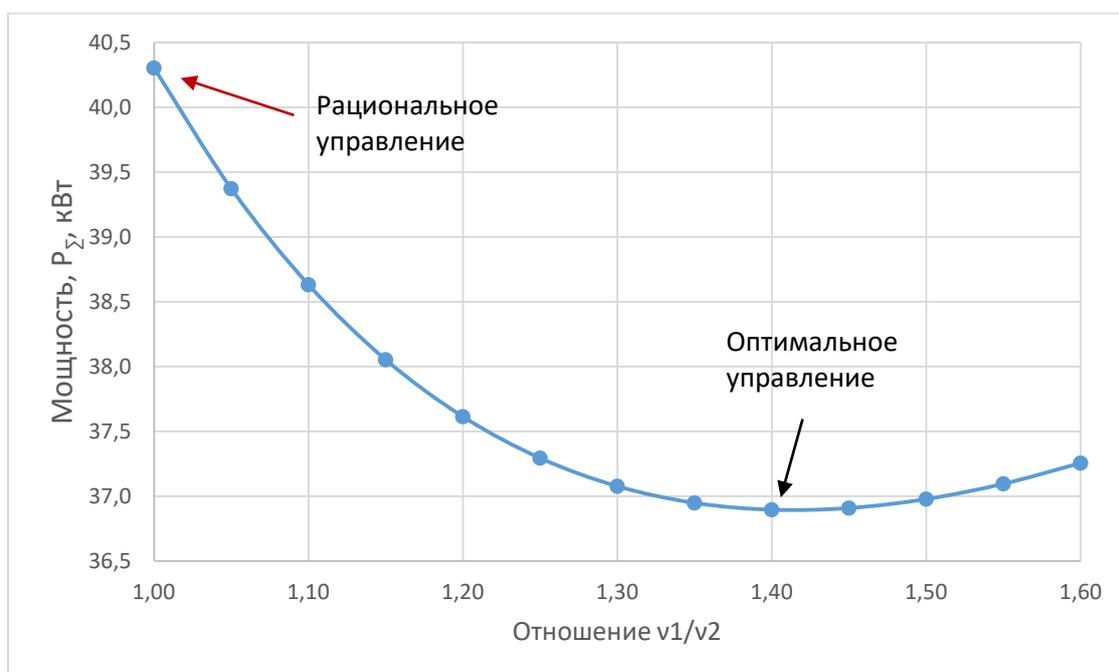


Рис. 6.2. Зависимость мощности на валу вентиляторов от отношения их скоростей

7. ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧРП В УСТАНОВКАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА

7.1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Чтобы оценить энергетическую эффективность использования ЧРП, необходимо сопоставить затраты на реализацию проекта модернизации с сокращением эксплуатационных расходов. Сокращение эксплуатационных расходов достигается, прежде всего, за счет снижения стоимости потребленной электроэнергии.

Необходимые инвестиции в проект рассчитываются достаточно просто – они определяются стоимостью частотных преобразователей и затратами на их монтаж и наладку.

Задача определения сэкономленной электроэнергии при замене дискретного регулирования частотным существенно сложнее [3].

Для нахождения экономии электроэнергии необходимо прежде всего рассчитать экономию мощности для конкретных условий работы установки охлаждения газа.

В случае дискретного управления для обеспечения требуемого температурного режима количество включенных двигателей вентиляторов, а следовательно, и их мощность, изменяются на суточном и годовом интервалах времени, что обусловлено в основном суточными и сезонными вариациями температуры наружного воздуха. Кроме того, изменяется длительность включения необходимого числа двигателей, а следовательно, и потребляемая электроэнергия.

Эти обстоятельства усложняют детальный расчет.

Для упрощения задачи целесообразно использовать широко применяемые в энергетике так называемые упорядоченные диаграммы, отражающие длительность работы установок с неизменной требуемой мощностью за время цикла. Время цикла, как правило, – это число часов работы установки в году.

Конкретно для рассматриваемой задачи следует использовать упорядоченную диаграмму мощности при дискретном управлении,

которая отражает длительность t_i работы установки с различными требуемыми постоянными значениями мощности за время цикла. Пример диаграммы приведен на рис. 7.1.

Мощность на диаграмме показана в относительных единицах, время также указано в относительных единицах:

$$t_i^* = \frac{t}{T_{\text{раб}}},$$

где $T_{\text{раб}}$ – время работы установки в течение года.

Упорядоченные диаграммы для УОГ с дискретным регулированием температуры, работающих в определенных климатических зонах, могут быть получены по результатам обработки информации автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии.

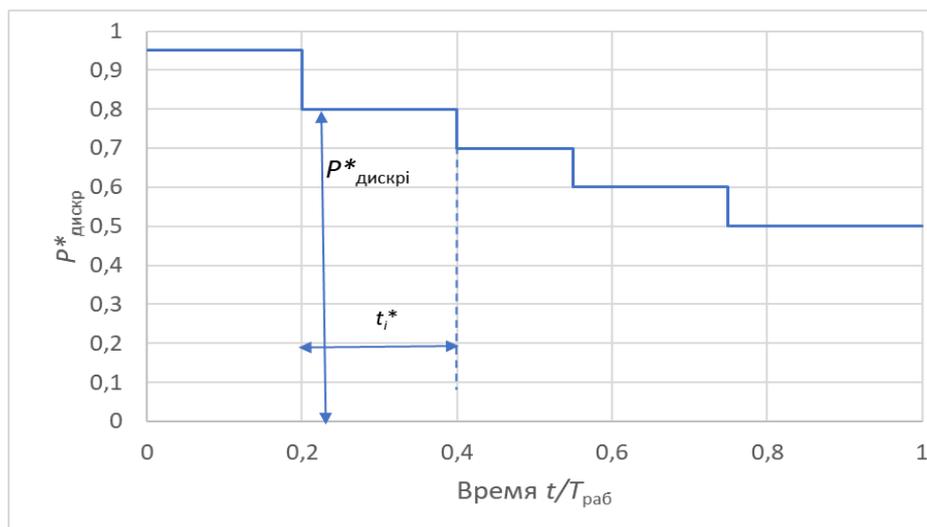


Рис. 7.1. Упорядоченная диаграмма мощности при дискретном регулировании

Далее необходимо установить взаимосвязь между мощностью на валу двигателей вентиляторов при дискретном регулировании и мощностью при использовании ЧРП.

В предыдущем разделе были получены выражения для мощности при дискретном и частотном управлении:

$$P_{\text{дискр}} = NP_{\text{ном}} \frac{\Delta T_{\text{уог}}}{\Delta T_{\text{max}}}; \quad (7.1)$$

$$P_{\text{чрп}} = NP_{\text{ном}} \left(\frac{\Delta T_{\text{уог}}}{\Delta T_{\text{max}}} \right)^3, \quad (7.2)$$

где N – число вентиляторов;

$P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность двигателя вентилятора, кВт;

$\frac{\Delta T_{\text{уог}}}{\Delta T_{\text{max}}}$ – относительный температурный перепад на УОГ;

T_{max} – максимальный температурный перепад на установке охлаждения при работе всех вентиляторов с номинальной частотой вращения $n_{\text{ном}}$.

Перейдем к расчетам мощности в относительных единицах.

Относительную мощность определим как отношение мощности в именованных единицах к суммарной мощности $NP_{\text{ном}}$ электродвигателей вентиляторов. Разделив правые и левые части выражений (7.1), (7.2) на $NP_{\text{ном}}$, для относительных мощностей при дискретном и частотном управлении получим:

$$P_{\text{дискр}}^* = \frac{P_{\text{дискр}}}{NP_{\text{ном}}} = \frac{\Delta T_{\text{уог}}}{\Delta T_{\text{max}}}; \quad (7.3)$$

$$P_{\text{чрп}}^* = \frac{P_{\text{чрп}}}{NP_{\text{ном}}} = \left(\frac{\Delta T_{\text{уог}}}{\Delta T_{\text{max}}} \right)^3. \quad (7.4)$$

Учтем, что температурный перепад на УОГ $\Delta T_{\text{уог}}$ должен быть равен требуемому $\Delta T_{\text{тр}}$. Тогда относительную требуемую мощность двигателей вентиляторов можно представить как функцию требуемого температурного перепада $\frac{\Delta T_{\text{тр}}}{\Delta T_{\text{max}}}$.

Учитывая выражения (7.3) и (7.4), относительную мощность при частотном управлении для определенного температурного перепада можно определить через мощность, потребляемую в тех же условиях при дискретном управлении:

$$P_{\text{чрп}}^* = (P_{\text{дискр}}^*)^3. \quad (7.5)$$

Следовательно, оценку экономии мощности при использовании ЧРП можно дать, используя содержащуюся в упорядоченных диаграммах информацию о значениях $P_{\text{дискр}}^*$.

Имея упорядоченную диаграмму, расчеты энергетической эффективности использования ЧРП взамен дискретного управления можно свести к следующему.

1. Для каждого интервала упорядоченной диаграммы рассчитывают мощность и экономию мощности при частотном управлении в относительных единицах:

$$P_{\text{чрп}i}^* = (P_{\text{дискр}i}^*)^3;$$
$$\Delta P_i^* = P_{\text{дискр}i}^* - P_{\text{чрп}i}^*.$$

Здесь значения $P_{\text{дискр}i}^*$ принимаются по упорядоченной диаграмме.

2. Находят экономию мощности на отдельных интервалах в именованных единицах:

$$\Delta P_i = NP_{\text{ном}} \Delta P_i^*.$$

3. Вычисляют экономию электроэнергии на отдельных интервалах:

$$\Delta W_i = \Delta P_i t_i^* T_{\text{раб}}.$$

4. Находят годовую экономию электроэнергии:

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

где l – количество интервалов упорядоченной диаграммы.

5. Определяют стоимость сэкономленной за год электроэнергии

$$C_{\text{э}} = \Delta W_{\Sigma} c_{\text{э}},$$

где $c_{\text{э}}$ – тариф на электроэнергию. Актуальные цены на электроэнергию следует искать в Интернете.

6. Далее для экономической оценки проекта определяют требуемую мощность преобразователя частоты для регулируемого привода одного вентилятора:

$$P_{\text{пч}} = (1,1 \dots 1,2) \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{дв}}},$$

где $\eta_{\text{дв}}$ – КПД двигателя принимают $\eta_{\text{дв}} = 0,8 \dots 0,85$.

Выбирают подходящий преобразователь частоты (ПЧ) и находят его цену $C_{\text{пч1}}$ (актуальные цены на преобразователи частоты следует искать в Интернете). При выборе следует ориентироваться на простые ПЧ со скалярным управлением (например, Altivar, VWD и др.), так как электроприводы АВО не требуют большого диапазона регулирования и высокой точности стабилизации скорости.

7. Находят общую стоимость преобразователей частоты:

$$C_{\text{пч}} = C_{\text{пч1}} N.$$

8. Рассчитывают срок окупаемости проекта модернизации по электроэнергии, год:

$$T_{\text{эл.эн}} = \frac{(1,2 \dots 1,3) C_{\text{пч}}}{C_{\text{ээ}}}.$$

Коэффициент 1,2–1,3 учитывает дополнительные затраты на монтаж и наладку ЧРП (предполагается, что двигатели вентиляторов не заменяются).

По величине срока окупаемости оценивают целесообразность проекта модернизации.

Следует отметить, что в приведенных ориентировочных расчетах не учитываются дополнительные *положительные факторы*, которые дает применение ЧРП.

Использование ЧРП вентиляторов УОГ, кроме экономии электроэнергии:

– позволяет за счет плавного пуска двигателей вентиляторов уменьшить износ механической части АВО и снизить нагрузки на систему электроснабжения, возникающие при прямом пуске двигателей;

– создает условия для использования системы автоматического регулирования температуры газа на выходе УОГ;

– позволяет отказаться от трудоемкой процедуры переустановки углов атаки лопастей вентиляторов; такая перенастройка при дискретном регулировании выполняется два раза в год в весенний и осенний периоды.

Следует иметь в виду, что использование ЧРП имеет и некоторые *отрицательные последствия*:

– возрастают гармонические искажения питающей электрической сети и электромагнитные помехи. Причинами появления гармонических искажений являются имеющиеся в составе ЧРП нелинейные входные цепи, потребляющие импульсный ток. Гармонические искажения особенно значительны, когда мощность преобразователей частоты соизмерима с мощностью питающего трансформатора. Широтно-модулированные прямоугольные импульсы напряжения на выходе преобразователя частоты создают широкий спектр высокочастотных помех, негативно влияющих на работу электротехнического оборудования. Для снижения гармонических искажений и электромагнитных помех в ряде случаев требуется установка дополнительных фильтров, что увеличивает стоимость ЧРП;

– снижается допустимая нагрузка двигателя. При питании АД от преобразователя частоты и работе на пониженных скоростях ухудшаются условия охлаждения самовентилируемых двигателей, так как снижается скорость вращения охлаждающего вентилятора. Кроме того, высшие гармоники вызывают больший нагрев обмоток двигателя (из-за индуктивного сопротивления) и пластин статора (из-за вихревых токов). Указанные обстоятельства могут потребовать замены двигателя на более мощный или снижения допустимой нагрузки эксплуатируемого двигателя.

Контрольные вопросы

1. Что показывает упорядоченная диаграмма?
2. Поясните последовательность расчетов для определения целесообразности использования ЧРП.
3. Перечислите достоинства и недостатки использования ЧРП.

7.2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Задание № 7.1

1. Для заданных номинальных данных установки охлаждения газа и годового графика нагрузки (табл. 7.1) оценить срок окупаемости проекта использования ЧРП.

2. Принять в качестве исходных данных номинальные значения мощности и числа двигателей вентиляторов по предыдущему заданию.

Методические указания. Дальнейшие расчеты рекомендуется вести в последовательности, изложенной выше в пп. 1–8. Расчеты по пп. 1–3 рекомендуется свести в таблицу (табл. 7.2).

Таблица 7.1

Вариант № 1	$P_{\text{дискри}}^*$	0,95	0,80	0,75	0,60	0,55	$T_{\text{раб}} = 5000$ ч
	t_i^*	0,30	0,20	0,20	0,15	0,15	
Вариант № 2	$P_{\text{дискри}}^*$	0,90	0,85	0,70	0,60	0,55	$T_{\text{раб}} = 4500$ ч
	t_i^*	0,25	0,25	0,20	0,15	0,15	
Вариант № 3	$P_{\text{дискри}}^*$	0,90	0,85	0,70	0,60	0,45	$T_{\text{раб}} = 5500$ ч
	t_i^*	0,20	0,20	0,20	0,15	0,25	
Вариант № 4	$P_{\text{дискри}}^*$	0,85	0,80	0,70	0,50	0,45	$T_{\text{раб}} = 5000$ ч
	t_i^*	0,25	0,20	0,15	0,20	0,20	
Вариант № 5	$P_{\text{дискри}}^*$	0,90	0,75	0,65	0,55	0,45	$T_{\text{раб}} = 4000$ ч
	t_i^*	0,20	0,20	0,20	0,25	0,15	
Вариант № 6	$P_{\text{дискри}}^*$	0,95	0,80	0,70	0,60	0,50	$T_{\text{раб}} = 4000$ ч
	t_i^*	0,20	0,20	0,15	0,20	0,25	

Таблица 7.2

i	$P_{\text{дискри}}^*$	t_i^*	$P_{\text{чрп}}^*$	ΔP_i^*	ΔP_i , кВт	ΔW_i , кВт·ч
1						
2						
3						
4						
5						

Содержание отчета

1. Краткая теория.
2. Задание на выполнение исследования.
3. Результаты расчетов.
4. Выводы по работе.

8. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТАМИ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА

Современная технология транспорта газа по магистральным трубопроводам, как уже отмечалось, требует его охлаждения после компримирования до определенной температуры. С этой целью на газотранспортных предприятиях используются установки охлаждения газа, содержащие несколько параллельно включенных аппаратов воздушного охлаждения газа.

На большинстве находящихся в эксплуатации компрессорных станций регулирование температуры газа на выходе установки охлаждения осуществляется оператором дискретно. При этом точность поддержания заданного значения температуры зависит от квалификации и опыта оператора.

Включение / отключение каждого вентилятора, как показано выше, приводит в установившемся режиме к изменению температуры на выходе на определенную величину, что определяет возможную точность поддержания заданной температуры даже при идеальных действиях оператора.

Использование непрерывного способа регулирования температуры газа на выходе установки охлаждения за счет изменения скорости вентиляторов с помощью частотно-регулируемых приводов создает предпосылки для перехода от «ручного» регулирования к автоматическому. Благодаря этому повышается точность поддержания заданного значения температуры, исключается негативное влияние прямых пусков двигателей (см. раздел 3), и оператор разгружается от напряженной ответственной работы.

Для управления температурой газа на выходе УОГ используют замкнутые системы автоматического управления (САУ) на базе частотно-регулируемого привода вентиляторов [4–6, 8–11].

В САУ установки охлаждения, как правило, используют отдельные каналы управления для каждого АВО. Упрощенная функциональная схема САУ температурой газа одного АВО показана на рис. 8.1.

Она содержит задатчик температуры газа, датчик температуры газа на выходе АВО, регулятор, частотно-регулируемый привод вентилятора и объект управления – аппарат воздушного охлаждения.

Типовые АВО, как правило, содержат два вентилятора, соответственно два ЧРП.

Система автоматического управления аппаратом воздушного охлаждения газа работает следующим образом. На входе регулятора происходит сравнение сигнала $U_{зд.}$, поступающего с задатчика температуры, и сигнала датчика $U_{дт}$ температуры и формируется сигнал ошибки (рассогласования):

$$U_{\delta} = U_{зд} - U_{дт}.$$

Регулятор преобразует сигнал ошибки и формирует сигнал на входе частотно-регулируемого электропривода, определяющий частоту f вращения электродвигателей вентиляторов. Последние воздействуют на теплообменник АВО потоком охлаждающего воздуха.

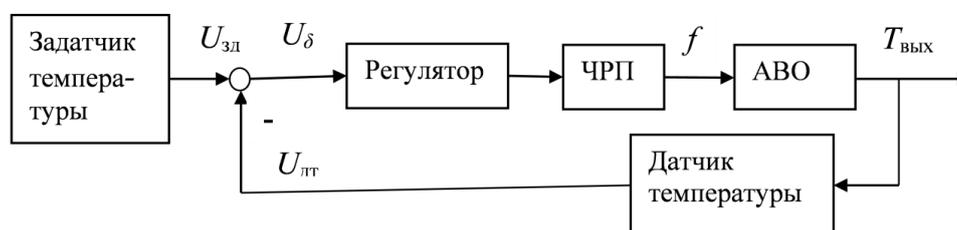


Рис. 8.1. Функциональная схема САУ

Система с регулятором, содержащим интегрирующую часть (И-, ПИ- или ПИД-регулятор), обладает астатизмом, т. е. в установившемся режиме сигнал на выходе датчика температуры равен сигналу задатчика температуры. На выходе регулятора при этом существует некоторый сигнал, определяющий частоту вращения вентиляторов.

При отклонении температуры от заданного значения появляется сигнал ошибки U_{δ} , начинает изменяться сигнал на выходе регулятора и частота вращения электродвигателей вентиляторов. Вследствие этого изменяется интенсивность потока охлаждающего воздуха, воздействующего на теплообменник.

Этот процесс продолжается до тех пор, пока сигнал на выходе датчика температуры не станет равным сигналу задатчика температуры. В результате обеспечивается стабилизация температуры газа на выходе аппарата воздушного охлаждения на заданном уровне.

В типовых установках охлаждения газа содержится несколько параллельно включенных АВО. Двигатели вентиляторов получают питание от индивидуальных преобразователей частоты. На ЧРП каждого вентилятора подается один и тот же сигнал, и вентиляторы вращаются с одинаковыми скоростями. За регулируемую величину обычно принимают температуру газа в выходном коллекторе УОГ, где и устанавливается датчик температуры.

Блок-схема САУ температуры газа, разработанная для одной из установок охлаждения, показана на рис. 8.2.

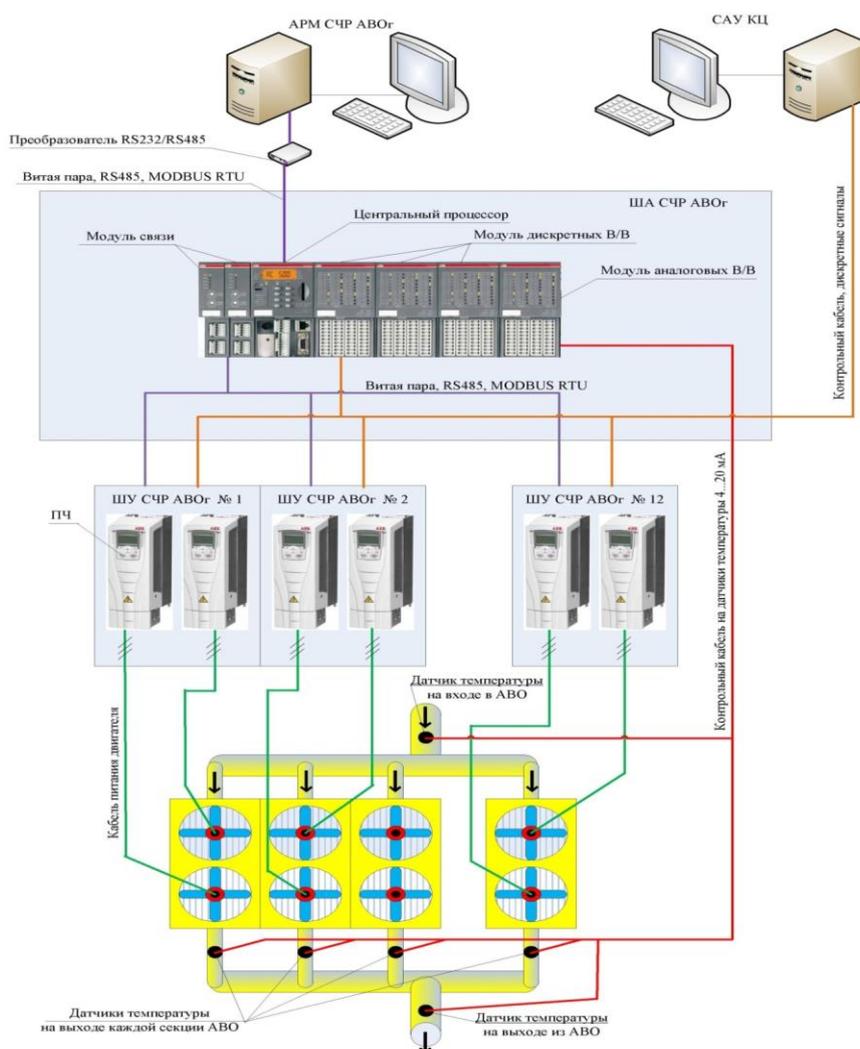


Рис. 8.2. Блок схема САУ

Система автоматического управления температурой газа смонтирована в КТП 10/0,4 кВ компрессорной станции. Система управляет штатной установкой охлаждения газа с двенадцатью аппаратами типа 2АВГ-75. Каждый аппарат воздушного охлаждения оснащен двумя вентиляторами (24 вентилятора), приводимыми в движение электродвигателями типа *ВАСО* мощностью 37 кВт.

Система управления представляет собой замкнутую систему управления температурой газа в выходном коллекторе АВО.

Управление температурой осуществляется путем изменения частоты вращения вентиляторов АВО с помощью преобразователей частоты (ПЧ).

В состав системы входят:

- 12 шкафов, в которых размещены 24 ПЧ (по одному ПЧ на каждый электродвигатель) и пускорегулирующая аппаратура;
- шкаф автоматики, в котором размещен контроллер, обеспечивающий автоматический режим работы, а также релейная схема, обеспечивающая дискретный режим работы двигателей вентиляторов;
- датчики температуры газа, установленные во входном и выходном коллекторах АВО, а также на выходе каждой секции АВО;
- автоматизированное рабочее место (АРМ), установленное в главном щите управления (ГЩУ) КЦ 9, 10.

Управление системой осуществляет оператор. На главном экране автоматизированного рабочего места представлено меню системы управления АВО газа и выводится информация о текущих параметрах системы (рис. 8.3).

В программном обеспечении центрального процессора контроллера реализован алгоритм автоматического регулирования температуры газа на основе ПИ-регулятора. Выходной сигнал ПИ-регулятора определяет величину задания частоты ПЧ. Значение текущей частоты вращения электродвигателя поступает в контроллер по каналам связи с каждого ПЧ.

Обратной связью в системе по умолчанию является температура газа в выходном коллекторе установки охлаждения газа, но в программе

контроллера реализована также возможность выбора в качестве датчика обратной связи датчика температуры газа на выходе отдельного АВО. Температура газа измеряется с помощью датчика температуры ТСПУ, например Метран-276-06-Ехiа-400-0,5-Н10-(-50+100) °С-(4-20)мА-Т5-У1.1-ГП (термопреобразователь с унифицированным выходным сигналом).



Рис. 8.3. Рабочий экран АРМ САУ температурой газа

В системе реализовано три основных режима работы: автоматический, полуавтоматический и ручной. Управление в основных режимах производится с АРМ АВО.

В автоматическом режиме с помощью алгоритма ПИД-регулирования поддерживается температура газа на выходе установки охлаждения газа, заданная на АРМ оператора. При этом все вентиляторы работают на одинаковой частоте.

В полуавтоматическом режиме оператор может самостоятельно выбрать способ включения каждого вентилятора в отдельности: через алгоритм ПИ-регулирования, либо плавный пуск на максимальной частоте.

При ручном режиме оператор регулирует температуру газа путем изменения количества работающих вентиляторов. При этом двигатели

вентиляторов пускаются плавно, с заданным временем разгона, и их пусковые токи не превышают номинальные.

Для устранения влияния частотно-регулируемых приводов на качество электроэнергии питающей сети применены ПЧ ABB ACS 550 со встроенным сетевым дросселем.

В цепи питания электродвигателей вентиляторов после ПЧ установлены моторные дроссели, предназначенные для компенсации емкостных токов длинных моторных кабелей. Использование дросселей позволяет скомпенсировать емкостные токи и соответственно препятствует ложным срабатываниям защиты ПЧ от сверхтоков.

Кроме того, моторные дроссели обеспечивают снижение выбросов напряжения на обмотках двигателя и подавление высокочастотных гармоник тока двигателя, вызывающих дополнительный нагрев двигателя, а также ограничение амплитуды тока короткого замыкания.

Использование моторных дросселей способствует снижению скорости нарастания аварийных токов короткого замыкания и задержке момента достижения максимума тока короткого замыкания, что обеспечивает необходимое время для срабатывания цепей электронной защиты ПЧ.

Контрольные вопросы

1. Используя функциональную схему, поясните, как будут изменяться переменные в системе в случае возрастания температуры газа на выходе.
2. С какой целью применены сетевой и моторный дроссели?
3. Какая информация выведена на рабочий экран АРМ?
4. В чем преимущество замкнутой САУ по сравнению с ручным управлением оператором?

9. РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ САУ ТЕМПЕРАТУРОЙ ГАЗА

9.1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

САУ температурой газа имеет ряд специфических особенностей, которые должны учитываться при ее проектировании [4–6, 8–11]:

– характерной особенностью рассматриваемой САУ является достаточно медленное изменение основного возмущающего воздействия – температуры наружного воздуха;

– кроме переходного процесса по температуре, для рассматриваемой САУ важное значение имеет качество переходного процесса изменения частоты вращения вентиляторов. Для указанного процесса недопустимо значительное перерегулирование, так как оно приводит к повышенным динамическим воздействиям на механическую часть вентиляторов;

– параметры объекта управления синтезируемой САУ, как показывают результаты проведенных исследований, могут варьироваться в достаточно широких пределах.

Последнее обстоятельство – значительный диапазон изменения параметров объекта управления требует использования адаптивных систем управления. Вопросы построения и исследования таких систем рассмотрены в [4–6]. Здесь ограничимся исследованием, не учитывающим вариации параметров объекта управления, и будем рассматривать один канал управления.

Структурная схема САУ приведена на рис. 9.1. Динамические свойства отдельных элементов на схеме для приращения переменных отражены соответствующими передаточными функциями (ПФ):

$W_o(p)$ – обобщенного объекта управления (ОУ), выходной переменной которого является температура газа на выходе θ , а входной – частота вращения вентиляторов f ;

$W_E(p)$ – ЧРП вентиляторов;

$W_D(p)$ – датчика температуры газа на выходе АВО;

$W_R(p)$ – регулятора.

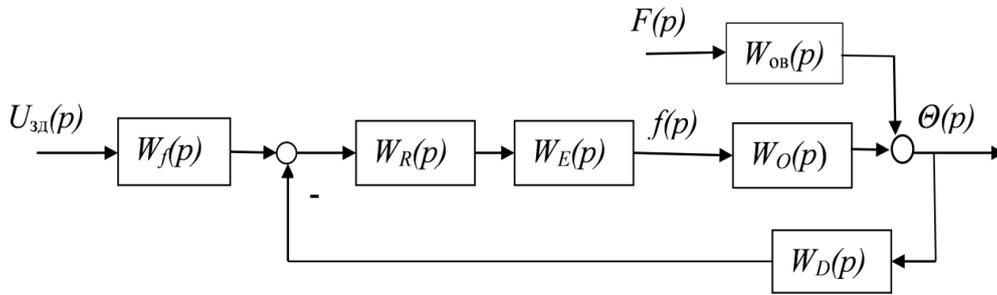


Рис. 9.1. Структурная схема САУ

На этапе синтеза рассматриваются номинальные объект, электропривод и датчик, динамические свойства которых определены передаточными функциями апериодических звеньев [4–6]:

$$W_E(p) = -\frac{k_E}{T_E p + 1}; \quad W_o(p) = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta f(p)} = -\frac{k_o}{T_o p + 1};$$

$$W_D(p) = \frac{k_D}{T_D p + 1}, \quad (9.1)$$

где k_o , k_E , k_D , T_o , T_E , T_D – коэффициенты передачи и постоянные времени ОУ, ЧРП и датчика, соответственно;

p – оператор Лапласа.

В качестве регулятора в системе используется пропорционально-интегральный регулятор с ПФ

$$W_R(p) = \frac{(T_{R1} p + 1)}{T_{R2} p}, \quad (9.2)$$

где постоянную времени T_{R1} регулятора следует принять $T_{R1} = T_o$.

Значение постоянной времени интегрирующего преобразования T_{R2} регулятора выбирается из соотношения

$$T_{R2} = b k_o k_E k_D T_D = b k_p T_D, \quad (9.3)$$

где b – настроечный коэффициент; k_o – номинальное (расчетное) значение коэффициента передачи ОУ; $k_p = k_o k_E k_D$ – расчетное значение коэффициента усиления разомкнутой системы.

Результаты аналитического исследования показывают, что увеличение коэффициента b в выражении (9.3) ведет к снижению

колебательного процесса изменения частоты вращения вентиляторов при ступенчатом изменении сигнала задания $U_{зд}$, а при определенном значении этого коэффициента процесс становится апериодическим. Результаты компьютерного эксперимента показывают, что целесообразно принимать значение коэффициента $b = 2,5 \dots 2,8$.

На входе системы включен фильтр с ПФ:

$$W_f(p) = \frac{1}{T_0 p + 1}. \quad (9.4)$$

Назначение фильтра поясняется ниже.

Наиболее неблагоприятным «быстрым» возмущением F на систему является отключение одного или нескольких смежных АВО. В разомкнутой системе такое возмущение приводит к повышению температуры на выходе УОГ по апериодическому закону. Будем рассматривать единичное возмущение, которое в разомкнутой системе после окончания переходного процесса вызывает отклонение температуры на 1°C , и представим ПФ объекта по возмущающему воздействию в виде:

$$W_{об}(p) = \frac{1}{T_0 p + 1}. \quad (9.5)$$

Контрольные вопросы

1. Укажите специфические особенности САУ температурой газа.
2. Перечислите основные требования к показателям качества регулирования САУ температурой газа.
3. Приведите математические модели основных элементов САУ.
4. Укажите тип регулятора, используемого в системе.

9.2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Задание № 9.1

Проведите исследование системы автоматического управления АВО. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 9.1. Для всех вариантов расчетов упрощенно принять $k_o = 1$, $k_E = 1$, $k_D = 1$.

Таблица 9.1

№ варианта	T_o , мин	T_E , мин	T_D , мин
1	3,1	0,05	0,15
2	2,5	0,10	0,17
3	2,2	0,15	0,21
4	2,6	0,08	0,16
5	2,8	0,06	0,14

Пример исследования. Исследование динамических характеристик САУ проводится моделированием с использованием программы *Classic*.

Поясним порядок исследования на примере.

Заданы значения $k_o = 1$, $k_E = 1$, $k_D = 1$, $T_o = 2,1$ мин, $T_E = 0,05$ мин, $T_D = 0,1$ мин.

В соответствии со структурной схемой (см. рис. 9.1) набираем модель системы (рис. 9.2).

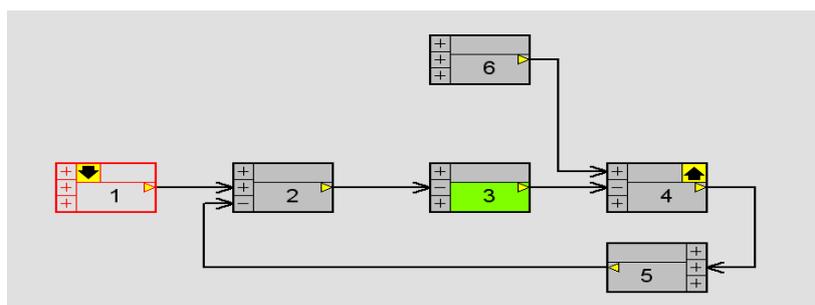


Рис. 9.2. Модель САУ

В блоке 1 задаем ПФ фильтра по выражению (9.4):

$$\frac{1}{1 + 2,1s}$$

По выражениям (9.2), (9.3) рассчитываем параметры регулятора:

$$T_{R1} = T_o = 2,1 \text{ мин};$$

$$T_{R2} = bk_p T_D = 2,8 \cdot 1 \cdot 0,1 = 0,28 \text{ мин}$$

и задаем ПФ регулятора в блоке 2:

$$\frac{1 + 2,1s}{0,25s}$$

В блоке 3 задаем ПФ $W_E(p)$ ЧРП вентиляторов:

$$-\frac{1}{1 + 0,05s}$$

В блоке 4 задаем ПФ $W_o(p)$ обобщенного объекта управления:

$$-\frac{1}{1 + 2,1s}$$

В блоке 5 – ПФ $W_D(p)$ датчика температуры газа на выходе АВО:

$$\frac{1}{1 + 0,1s}$$

В блоке 6 задаем ПФ $W_{об}(p)$ объекта по возмущающему воздействию:

$$\frac{1}{1 + 2,1s}$$

Далее проводим исследование переходных процессов в системе.

1. Для моделирования переходного процесса **по управляющему воздействию** назначаем блок 1 варьируемым, устанавливаем на нем *Вход*, *Выход* – на блоке 4 и проводим расчет. Результаты расчета показаны на рис. 9.3: кривая 1 – без фильтра, кривая 2 – с фильтром (чтобы получить график без фильтра, задайте знаменатель блока 1 равным 1).

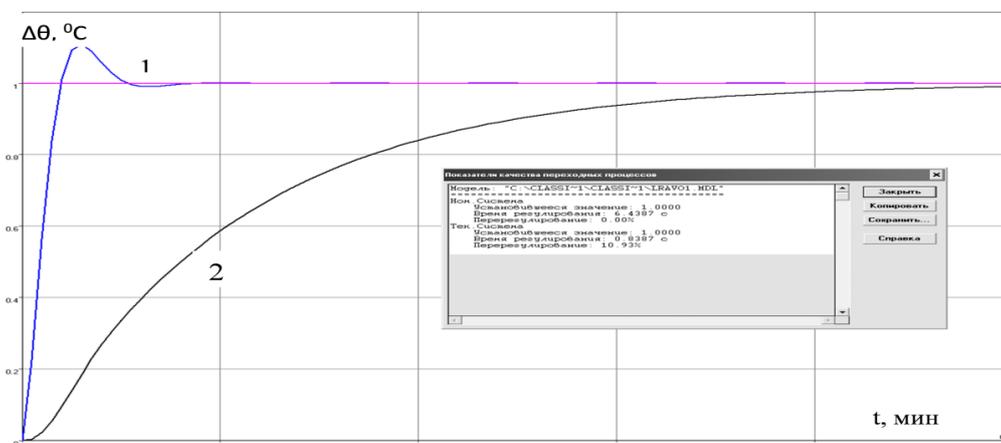


Рис. 9.3. Графики переходных процессов по управляющему воздействию

Рассматриваемый переходный процесс показывает изменение температуры газа на выходе при единичном ступенчатом изменении сигнала задания. В САУ без фильтра переходный процесс (рис. 9.3, кривая 1) протекает значительно быстрее, чем в системе с фильтром (рис. 9.3, кривая 2). Оцените показатели качества переходного процесса.

На рис. 9.4 показаны графики изменения частоты вращения вентиляторов при единичном ступенчатом изменении сигнала задания: кривая 1 – без фильтра, кривая 2 – с фильтром.

Для получения графиков *Выход* нужно перенести на блок 3. Из графиков следует, что при увеличении заданного значения температуры частота вращения вентиляторов снижается. Без фильтра частота снижается очень интенсивно с большим перерегулированием, что приводит к недопустимо большим перегрузкам механической части. Введение фильтра позволяет обеспечить апериодический процесс изменения частоты вращения вентиляторов.

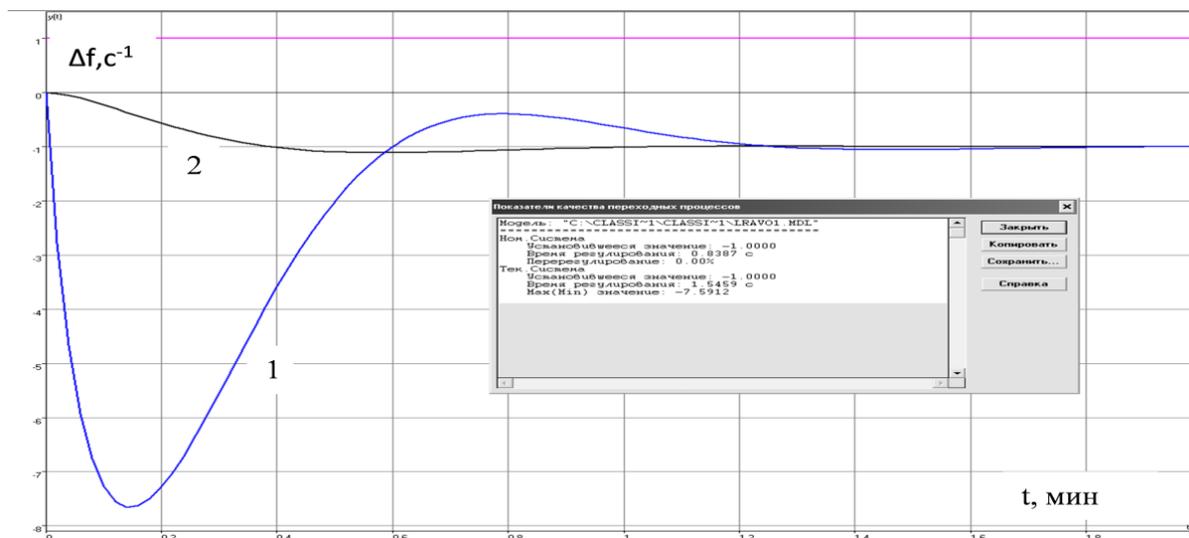


Рис. 9.4. Графики переходных процессов по задающему воздействию для частоты вращения вентиляторов

2. Для исследования переходных процессов *по возмущающему воздействию* переносим *Вход* на блок 6 модели (*Выход* на блоке 4). В блоке 6 задана ПФ, отражающая динамические свойства объекта по возмущению. Модель позволяет исследовать переходные процес-

сы при отключении одного или нескольких смежных АВО. В этой ситуации, если система не замкнута, температура на выходе установки будет повышаться (рис. 9.5, кривая 1). Для моделирования этого переходного процесса назначьте блок 3 варьируемым и задайте его коэффициент передачи (числитель) равным 0.

В замкнутой системе, благодаря действию обратной связи, частота вращения вентиляторов, оставшихся в работе АВО, будет повышаться, и отклонение температуры будет ликвидировано (рис. 9.5, кривая 2). Для моделирования этого процесса установите в блоке 3 коэффициент передачи равным 1).

Как следует из рис. 9.5, в разомкнутой системе при выбранном единичном воздействии отклонение температуры (статическая ошибка) составит $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. В замкнутой системе максимальное динамическое отклонение температуры не превышает $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а статическая ошибка равна 0.

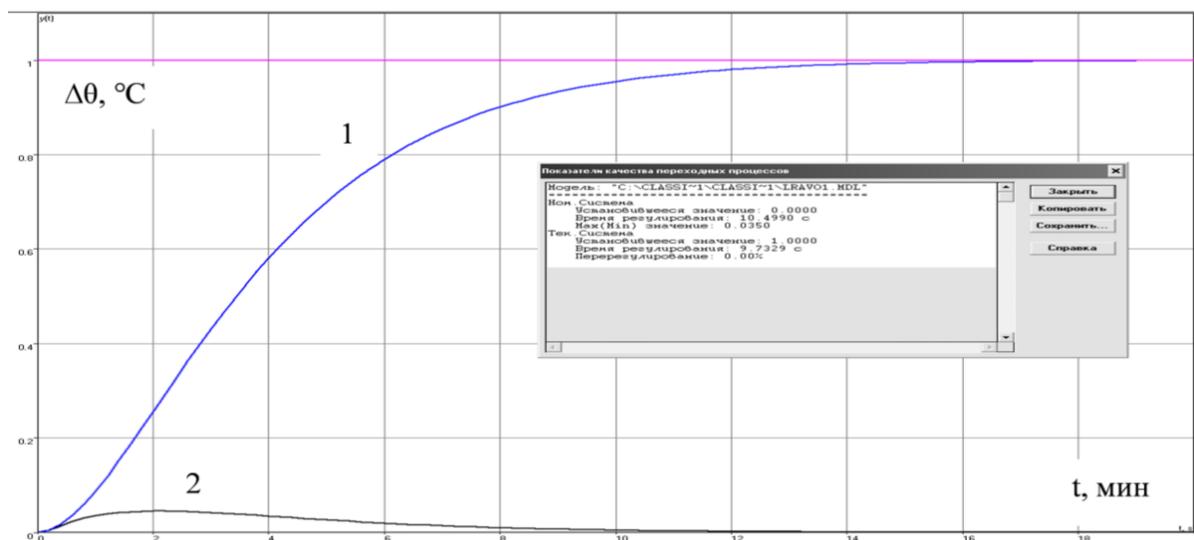


Рис. 9.5. Графики изменения температуры на выходе САУ при действии возмущения:

1 – разомкнутая система; 2 – замкнутая система

График изменения частоты вращения вентиляторов для этого процесса приведен на рис. 9.6. Для моделирования этого процесса перенесите *Выход* на блок 3. Как следует из графика, переходный процесс протекает без перерегулирования.

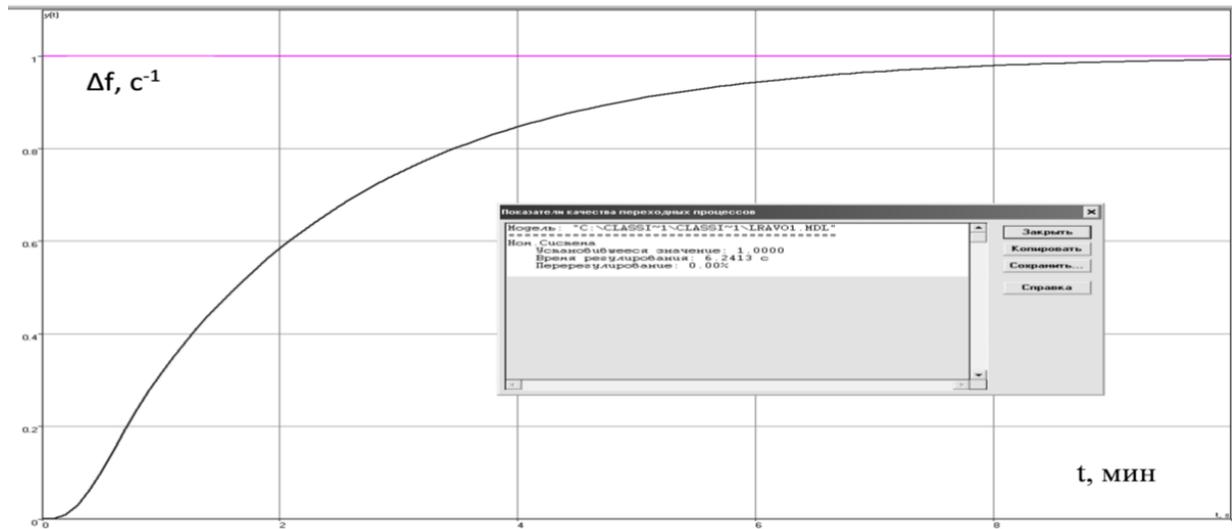


Рис. 9.6. График изменения частоты вращения вентиляторов при действии возмущения

Таким образом, в разработанной системе обеспечивается стабилизация температуры газа с нулевой статической ошибкой, а переходные процессы изменения частоты вращения вентиляторов протекают без перерегулирования.

Дополнительное задание. Рассмотренные результаты получены в предположении, что параметры объекта управления (коэффициент передачи и постоянная времени) остаются неизменными.

В реальных условиях эксплуатации параметры объекта управления изменяются. Проведите исследование тех же переходных процессов для случая, когда параметры регулятора остаются неизменными, а коэффициент передачи объекта увеличивается в 2–5 раз.

Содержание отчета

1. Постановка задачи исследования, исходные данные для расчета.
2. Структурная и компьютерная модель системы.
3. Расчет параметров регулятора.
4. Графики переходных процессов в САУ по управляющему и возмущающему воздействиям и их анализ.
5. Выводы по работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основное внимание в учебном пособии уделено анализу возможности снижения потребления электроэнергии на нужды охлаждения в системах магистрального транспорта природного газа. Регулирование температуры на выходе установок охлаждения газа традиционно осуществляется дискретным способом за счет включения / отключения электродвигателей вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения.

Показано, что благодаря нелинейной зависимости мощности на валу вентиляторов от скорости, использование непрерывного регулирования скорости вентиляторов вместо дискретного позволяет существенно снизить потребление электроэнергии. Непрерывное регулирование скорости асинхронных короткозамкнутых двигателей вентиляторов реализуется с помощью частотно-регулируемых приводов.

Рассмотрена задача оптимизации режимов работы установок охлаждения при дискретном и непрерывном управлении с учетом особенностей индивидуальных характеристик аппаратов воздушного охлаждения, и показана возможность дополнительного снижения потребления электроэнергии за счет использования оптимальных алгоритмов управления двигателями вентиляторов.

Приведена методика определения экономии электроэнергии при замене дискретного регулирования на непрерывное с помощью частотно-регулируемых приводов и оценке на этой основе срока окупаемости проектов модернизации.

Рассмотрены особенности построения и технической реализации систем автоматического управления температурой газа на выходе установок охлаждения, выполненных на базе частотно-регулируемых приводов вентиляторов. Обсуждаются требования к статическим и динамическим характеристикам замкнутой системы автоматического управления температурой газа на выходе установки охлаждения. Приведены математические модели основных элементов САУ и методика расчета и компьютерного моделирования ее динамических характеристик.

Изложенные в пособии сведения, естественно, не могут претендовать на полное освещение проблемы повышения энергоэффективности в сфере магистрального транспорта природного газа.

Дополнительные сведения по этой проблеме можно получить в литературе, в частности, приведенной в библиографическом списке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абакумов, А.М. Оптимизация режимов работы установок охлаждения в системах магистрального транспорта газа / А.М. Абакумов, Н.В. Андрейкин, Д.А. Владимиров, А.А. Горячкин, Я.А. Ратцев // Ашировские чтения. Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2020. – С. 396–398.
2. Абакумов, А.М. Применение современного электропривода переменного тока в технологиях газовой и нефтяной промышленности / А.М. Абакумов, С.В. Алимов, В. Зипман, Л.А. Мигачева, Г.Р. Шварц // Кн. 3. – М.: Машиностроение-1, 2009. – 132 с.
3. Абакумов, А.М. Энергетическая эффективность установок охлаждения природного газа с частотно-регулируемым приводом вентиляторов / А.М. Абакумов, В.Е. Антропов, О.А. Абакумов // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. – 2019. – № 3. – С. 95–104.
4. Абакумов, А.М. Степашкин, И.П. Исследование систем автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения природного газа / А.М. Абакумов, И.П. Степашкин // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. – 2018. – № 2 (58). – С. 92–101.
5. Абакумов, А.М. Исследование системы управления аппаратом воздушного охлаждения природного газа / А.М. Абакумов, А.В. Мигачев, И.П. Степашкин // Известия вузов. Электромеханика. – 2016. – № 6. – С. 130–134.
6. Абакумов, А.М. Исследование системы автоматического управления температурой газа на выходе аппаратов воздушного охлаждения / А.М. Абакумов, С.В. Алимов, Л.А. Мигачева, А.В. Мигачев // Известия вузов. Электромеханика. – 2014. – № 5. – С. 68–71.
7. Алимов, С.В. Моделирование установившихся процессов теплообмена в аппаратах воздушного охлаждения газа / С.В. Алимов, И.А. Данилушкин, В.Н. Мосин // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. – 2010. – № 2 (26). – С. 178–186.
8. Артюхов, И.И. Автоматическое управление аппаратами воздушного охлаждения на объектах магистрального транспорта газа / И.И. Артюхов, И.И. Аршакян, И.П. Крылов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – № 1. – С. 33–36.
9. Артюхов, И.И. Некоторые аспекты применения частотно-регулируемого электропривода в системах воздушного охлаждения компримированного

- газа / И.И. Артюхов, И.И. Аршакян, М.В. Жабский, А.В. Коротков, Н.В. Погодин, А.А. Тримбач // Вестник СГТУ. – 2006. – № 1 (100). – Вып. 1. – С. 20–29.
10. Артюхов, И.И. Автоматическое управление аппаратами воздушного охлаждения на объектах магистрального транспорта газа / И.И. Артюхов, И.И. Аршакян, И.П. Крылов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – № 1. – С. 33–36.
 11. Артюхов, И.И. Ресурсосберегающая технология охлаждения газа на компрессорных станциях / И.И. Артюхов, И.И. Аршакян, Р.Ш. Тарисов, А.А. Тримбач, Е.В. Устинов // Вестник СГТУ. – 2011. – № 1 (54). – Вып. 3. – С. 25–32.
 12. Ванчин, А.Г. Расчет работы узла воздушного охлаждения газа в условиях компрессорной станции магистрального газопровода [Электронный ресурс] / А.Г. Ванчин // Нефтегазовое дело. – 2013. – Вып. № 3. – С. 164–179. – Режим доступа: <http://www.ogbus.ru>
 13. Шайхутдинов, А.З. Современные АВО газа – ресурс энергосбережения в газовой отрасли / А.З. Шайхутдинов, В.А. Лифанов, В.А. Маланичев // Газовая промышленность. – 2010. – № 9. – С. 40–41.
 14. Шварц, Г.Р. Применение регулируемого электропривода в технологиях транспорта нефти и газа / Г.Р. Шварц, А.М. Абакумов, Л.А. Мигачева, Ф.Н. Рассказов, П.К. Кузнецов // Кн. 1. – М.: Машиностроение-1, 2008. – 240 с.
 15. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р. «об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035». Номер опубликования: 0001202006110003. Дата опубликования: 11.06.2020.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАГИСТРАЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ ГАЗА	7
2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ	9
2.1. Приводы газоперекачивающих агрегатов	9
2.2. Установки охлаждения газа. Энергетическое оборудование установок	15
3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ДИСКРЕТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ.....	25
3.1. Краткая теория.....	25
3.2. Практическая часть	29
4. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВОК ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА ПРИ ДИСКРЕТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ.....	31
4.1. Краткая теория.....	31
4.2. Практическая часть	33
5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ	40
5.1. Краткая теория.....	40
5.2. Практическая часть	43
6. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВОК ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ ВЕНТИЛЯТОРОВ	46
6.1. Краткая теория.....	46
6.2. Практическая часть	52
7. ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧРП В УСТАНОВКАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА	55
7.1. Краткая теория.....	55
7.2. Практическая часть	61

8. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТАМИ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА	63
9. РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ САУ ТЕМПЕРАТУРОЙ ГАЗА.....	69
9.1. Краткая теория.....	69
9.2. Практическая часть	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	77
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	79

Учебное издание

АБАКУМОВ Александр Михайлович
ОВСЯННИКОВ Владимир Николаевич

**Энергосберегающий электропривод
в системах магистрального транспорта природного газа**

Редактор *Н.В. Беганова*
Компьютерная верстка *М.В. Марченко*
Выпускающий редактор *Ю.А. Петропольская*

Подписано в печать 07.06.24
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная
Усл. п. л. 4,83. Уч.-изд. л. 4,77
Тираж 30 экз. Рег. № 61/24

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии
Самарского государственного технического университета
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус № 8