

Р.Л. Авраменко, Р.В. Белянкин, Е.В. Устинов —  
ЗАО «Газмашпроект»

# ВНЕДРЕНИЕ ЧАСТОТНО- РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА ДЛЯ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО И ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГАЗОКОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ

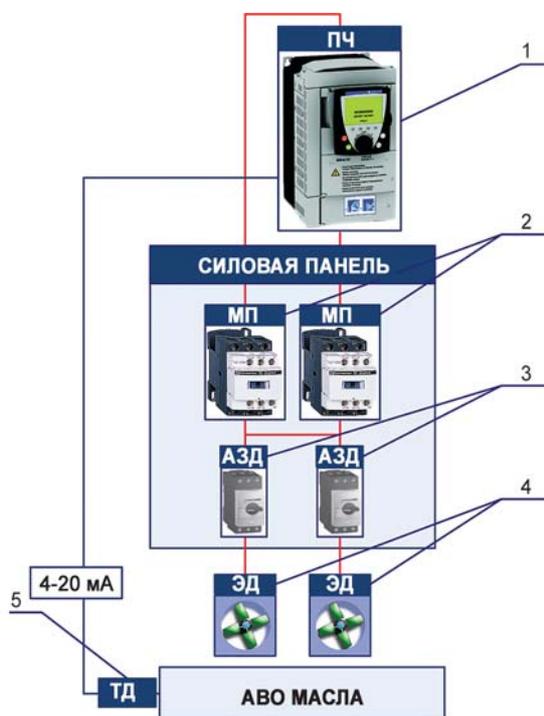


Рис. 1. Схема устройства АВО масла с частотным регулированием.

1 – преобразователь частоты; 2 – магнитные пускатели; 3 – тепловые автоматы защиты двигателей; 4 – вентиляторы, 5 – термодатчик

Воздушное охлаждение широко используется на газокomppressorных станциях. В частности, воздушная среда используется для охлаждения газа в аппаратах воздушного охлаждения (АВО), масла в системах двигателей и нагнетателей ГПА, а также для поддержания требуемого температурного режима внутри отсеков ГПА, т.е. вентиляции.

Поскольку температура наружного воздуха изменяется в весьма широких пределах, регулирование температуры охлаждаемой среды возможно изменением расхода подаваемого воздуха. Регулирование расхода воздуха в вентиляционных системах можно осуществлять одним из следующих способов.

- ◆ традиционно изменением проходного сечения при помощи воздушных клапанов (жалюзи) и/или отключением части вентиляторов, если в системе их несколько;
- ◆ использованием воздушных колес изменяемого шага;
- ◆ регулированием расхода изменением частоты вращения вентиляторов.

Первые два способа имеют существенные и очевидные недостатки.

Так, использование воздушных жалюзи сопровождается значительными энергетическими потерями, связанными с «зажиманием» воздушных каналов при работающих с полной нагрузкой электродвигателях.

Регулирование включением/выключением вентиляторов также далеко не идеально в плане расходования электроэнергии. Более того, оно сокращает срок службы вентиляторов

за счет пиковых электрических нагрузок на сеть и обмотки двигателя и повышенных механических нагрузок на рабочие колеса при пуске двигателей.

Применение колес изменяемого шага позволяет исключить отмеченные недостатки, но сложность изготовления, высокая стоимость и пониженная надежность таких устройств сводят на нет возможности их внедрения в вентиляционных системах.

Самым удобным способом регулирования представляется третий, связанный с изменением частоты вращения рабочего колеса. Реализация данного метода осложняется тем, что частота вращения вала асинхронного электродвигателя достаточно жестко связана с частотой тока или напряжения в питающей сети. По данной причине изначально не было устройств, позволяющих регулировать частоту вращения данных двигателей. Ситуация существенно изменилась в конце прошлого века с изобретением инверторов, или преобразователей частоты (далее ПЧ). Эти устройства, созданные на базе мощных полупроводниковых элементов, позволяют изменять частоту тока на выходе, и, следовательно, частоту вращения вала подключенных к ним асинхронных электродвигателей. Возможность плавного изменения расхода воздуха за счет изменения скорости вращения вентиляторов с асинхронными двигателями обеспечила целесообразность и перспективность внедрения ПЧ для управления вентиляционными системами и теплообменным оборудованием.

С 2004 года ЗАО «Газмашпроект» разрабатывает и внедряет на объектах ОАО «Газпром» системы частотного регулирования для управления вентиляцией и теплообменными аппаратами. 17-19 августа 2010 г. на КС «Ново-Пелымская» ООО «Газпром трансгаз Югорск» проходили приемочные испытания АВО масла с частотно-регулируемым приводом и системы вентиляции и обогрева двигательного отсека ГПА-Ц-16. Для ознакомления приемочной комиссии была также продемонстрирована первая разработка ЗАО «Газмашпроект» в области управления теплообменным оборудованием – система частотного регулирования АВО газа на КС «Ново-Комсомольская», находящаяся в эксплуатации

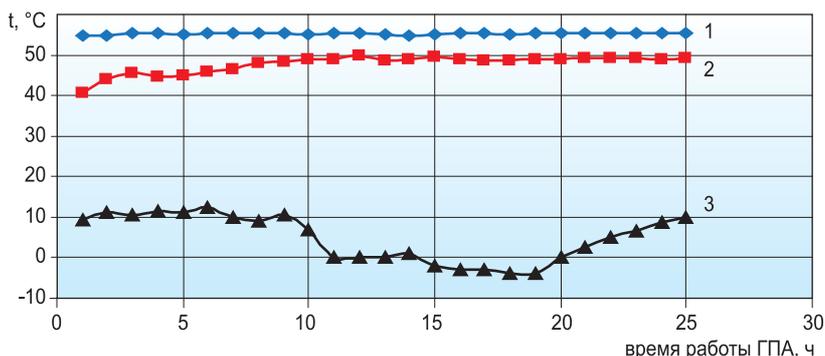


Рис. 2. Изменение по времени температуры масла двигателя (1), нагнетателя (2) на выходе АВО масла и температуры воздуха (3)

с 2005 г. и прошедшая приемочные испытания в 2008 году. Общим для всех этих систем является применение частотно-регулируемого привода вентиляторов для регулирования расхода воздуха, подаваемого на охлаждение теплоносителя. Во всех случаях применяются сходные автоматические системы поддержания заданной температуры охлаждаемой среды. Частота вращения вентилятора изменяется по сигналу (обратной связи) от термодатчика с использованием алгоритма пропорционально-интегрального регулирования.

Остановимся подробнее на устройстве и принципах работы названных выше систем.

Система частотного регулирования АВО масла двигателя и нагнетателя для ГПА-Ц-16 состоит из двух силовых модулей (рис. 1) для управления охлаждением масла двигателя и нагнетателя соответственно.

Основными элементами электрической схемы силового модуля являются преобразователь частоты (ПЧ), магнитные пускатели (МП), автоматы защиты двигателей (АЗД). Питание асинхронных электродвигателей АВО масла (ЭД) в штатном режиме работы осуществляется через преобразователь частоты. При этом регулирование расхода протекающего через теплообменник воздуха достигается за счет изменения частоты тока преобразователем частоты по сигналу обратной связи от термо-

датчика, установленного в масляной магистрали за АВО. В качестве алгоритма используется пропорционально-интегральный регулятор, работающий по программе, «прошитой» на плате контроллера преобразователя частоты. На случай выхода из строя преобразователя частоты, сбоев в системе электропитания и других нештатных ситуаций предусмотрена резервная обходная линия питания электродвигателей напрямую, т.е. в обход преобразователя частоты. Регулирование температуры масла в этом режиме выполняется традиционным способом – периодическими запусками и остановками двигателей вентиляторов. Переключение режимов работы с основного (через частотный преобразователь) на резервный (обходной) осуществляется магнитными пускателями.

Как показали испытания, при частотном регулировании скорости вращения вентиляторов система устойчиво поддерживает заданные температуры масла двигателя и нагнетателя (рис. 2).

При традиционном управлении АВО масла (периодическим включением и отключением вентиляторов) температура масла на выходе претерпевает значительные колебания. Амплитуда данных колебаний 5-10°, временной период 5-10 мин., что соответствует времени работы вентилятора между периодическими остановками.

Помимо высокой точности поддержания заданной температуры масла испытаниями была подтверждена значительная экономия электрической энергии при использовании частотного регулирования по сравнению с традиционным управлением температурой масла периодическим включением/отключением

одного из вентиляторов. Следует отметить, что экономия электроэнергии при частотном регулировании вентиляторов АВО основана на фундаментальных законах теплофизики и подробно обсуждалась на семинарах и в дискуссиях разного уровня. Более подробно к этому вопросу мы вернемся при описании применения систем частотного регулирования для АВО газа, где за счет большей мощности двигателей этот аспект (преимущество) частотного регулирования приобретает наибольшую практическую значимость.

В процессе испытаний система частотного регулирования продемонстрировала устойчивую работу (табл. 1).

Преимуществами частотного регулирования АВО масла являются:

◆ Точное поддержание температуры масла двигателя и нагнетателя в автоматическом режиме. Поскольку колебания температуры масла отсутствуют, режим работы двигателя (оборота свободной турбины) стабилен.

◆ При частотном регулировании работа двигателей вентиляторов происходит в более благоприятных условиях – отсутствуют частые пуски/остановы двигателей. При запуске вентиляторов в работу после запуска ГПА

разгон вентиляторов происходит плавно, без забросов по току. Уровень вибрации вентиляторов при работе на пониженных частотах оказывается ниже, чем при номинальной синхронной частоте 50 Гц. Совокупность данных факторов должна привести к увеличению срока службы двигателей вентиляторов.

◆ Затраты энергии на привод вентиляторов при использовании СЧР оказываются существенно ниже, чем при традиционном способе регулирования температуры масла.

Система вентиляции и обогрева двигательного отсека ГПА-Ц-16 состоит из двух модулей, устанавливаемых на крытие ГПА, и щита управления, монтируемого в отсеке автоматики (рис. 3, 4). Она предназначена для вентиляции отсека двигателя во время работы ГПА и обогрева отсека в холодное время года при остановленном ГПА, находящемся в резерве или ремонте.

В состав каждого модуля входят вентилятор, внутренний

и наружный воздушные клапаны, а также три пояса ТЭНов. Управление системой осуществляется по сигналам с термодатчиков, установленных в отсеке ГПА и за поясами ТЭНов. Предусмотрены автоматический (основной) и ручной (резервный) режимы работы системы. В автоматическом режиме в зависимости от температуры внутри отсека система управления включает в работу модули в режиме вентиляции или в режиме обогрева. В режиме вентиляции внутренний воздушный клапан модуля закрыт, а наружный открыт, вентилятор работает в «прямом» режиме, обеспечивая приток наружного воздуха в отсек двигателя. Производительность вентиляторов каждого модуля 18 тыс. куб. м в час. Управление вентиляторами осуществляется преобразователем частоты по алгоритму пропорционального регулятора (обороты вентилятора линейно связаны с температурой внутри отсека). В режиме обогрева вентилятор вращается в противоположном, «реверсивном» направлении, наружный воздушный клапан закрыт, а внутренний открыт. Таким образом реализуется циркуляция воздуха внутри отсека. Обогрев воздуха про-

Таблица 1

Результаты испытаний АВО масла с частотно-регулируемым приводом вентиляторов

Измерение показателей качества электрической энергии	Привносимое искажение синусоидальности кривой напряжения в системе электроснабжения КЦ и долевое содержание высших гармоник в кривой напряжения удовлетворяют требованиям ГОСТ 13109-97. Существенного влияния на качество электрической энергии в питающей сети не замечено.
Измерение уровня вибраций двигателей АВОМ	Уровень вибраций монотонно падает по мере снижения частоты тока. Резонансных эффектов при изменении частоты вращения вентиляторов не выявлено.
Проверка работы системы в режиме запуска ГПА	Запуск вентиляторов МОД при температуре 52,7 °С на входе двигателя. Время переходного процесса 9 мин.
Работа системы в режиме частотного регулирования	Обеспечивается устойчивая работа системы. Отклонение от заданной температуры 55 °С не превышает ±0,5 °С.
Работа системы в режиме дискретного регулирования	Управление от САУ ГПА функционирует нормально.
Управление системой с пульта управления	Система адекватно реагирует на команды с пульта управления.
Работа системы при различных видах отказов	СЧР-АВОМ устойчива к отказам: – при отказе ПЧ система автоматически переходит на дискретный режим управления от САУ ГПА; – при отказе термодатчика система переходит на дискретный режим управления от САУ ГПА; – время переключения на резервный алгоритм управления 10 с, заметного изменения температуры масла за время переключения на резервный алгоритм управления не наблюдается.
Оценка суточного потребления электроэнергии в дискретном и частотном режимах управления	Суточное потребление электроэнергии: – в режиме частотного регулирования: 26,17 кВт·ч при среднесуточной температуре воздуха 4,8 °С. – в режиме дискретного регулирования: 150,63 кВт·ч при среднесуточной температуре воздуха 11,5 °С.

изводится ТЭНами. В зависимости от температуры внутри отсека система управления включает в работу один, два, или три пояса ТЭНов. Суммарная тепловая мощность всех ТЭНов двух модулей 70 кВт, что достаточно для поддержания температуры воздуха внутри укрытия не ниже 10-15 °С при морозах до -50 °С.

За счет применения частотно-регулируемого привода вентиляторов удалось добиться адекватного регулирования количества нагнетаемого в отсек воздуха в режиме вентиляции изменением скорости вращения вентиляторов. Кроме того, преобразователи частоты позволили без лишних коммутационных элементов электрической схемы реализовать вращение вентиляторов в прямом и реверсивном направлении, обеспечивая при этом плавный пуск двигателей без превышения номинального тока, что увеличивает срок службы электродвигателей.

Система частотного регулирования АВО газа, впервые внедренная на КС «Ново-Комсомольская» ООО «Газпром трансгаз Югорск» в 2005 г. и прошедшая приемочные испытания в 2008 году, позволяет управлять температурой газа в выходном коллекторе с вы-

сокой точностью в автоматическом режиме без вмешательства оператора. По сравнению с традиционным способом регулирования степени охлаждения газа периодическим отключением и включением вентиляторов система частотного регулирования обладает целым рядом преимуществ:

- ◆ Исключаются сезонные работы по перенастройке угла атаки вентиляторов АВО.
- ◆ Обеспечивается плавный пуск вентиляторов без превышения номинального значения тока.
- ◆ Преобразователи частоты защищают двигатели, постоянно осуществляя диагностику электрической цепи. Они ограничивают ток двигателей, тем самым исключая возможность перегрева обмоток двигателя в нештатных и аварийных ситуациях, например при заклинивании вала, КЗ или межвитковом замыкании обмоток.
- ◆ Применение частотно-регулируемого привода позволяет добиться значительной эконо-

мии электроэнергии (по результатам эксплуатации в разные периоды от 21% до 57%).

Экономия электроэнергии при использовании частотного привода вентиляторов АВО газа имеет большое практическое значение, поскольку на компрессорных станциях с газотурбинным приводом нагнетателя доля расхода электроэнергии на охлаждение газа достигает 70%.

Экономия электроэнергии, затрачиваемой на привод вентиляторов теплообменного оборудования при частотном регулировании, является универсальным явлением, основанным на законах аэродинамики и теплофизики, и практически не зависит от конструктивных особенностей теплообменного оборудования и типа теплоносителя. Рассмотрим подробнее данный эффект на примере АВО газа с частотным приводом.

В теплообменнике аппарата воздушного охлаждения газ протекает по тонким горизонтальным оребренным трубкам с входного на выходной коллектор. Трубки обтекаются поперечным потоком воздуха, создаваемым расположенными снизу (или сверху) теплообменника вентиляторами.



Рис. 3. Внешний вид модуля вентиляции и обогрева, установленного на укрытии двигательного отсека ГПА-Ц-16

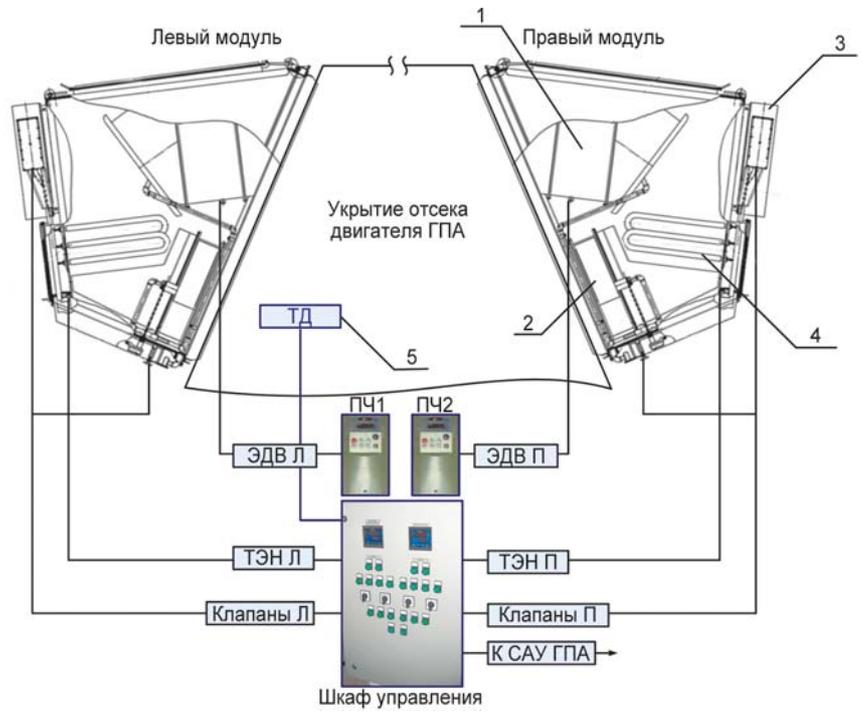


Рис. 4. Схема устройства системы вентиляции и обогрева с частотным приводом вентиляторов для отсека ГПА Ц-16. 1 – вентилятор; 2 – внутренний воздушный клапан; 3 – наружный воздушный клапан; 4 – ТЭНы; 5 – термодатчик

Рассмотрим изменение температуры газа вдоль труб теплообменника (в зависимости от координаты  $x$ , отсчитываемой по потоку газа вдоль трубки).

$$qC_p \frac{\partial T}{\partial x} = -Q \quad (1)$$

где  $q$  – расход газа через трубку теплообменника,  $C_p$  и  $T$  – теплоемкость при постоянном давлении и температура газа,  $Q$  – снимаемый воздухом тепловой поток с единицы длины трубки, для которого имеем формулу Ньютона – Рихмана:

$$Q = \alpha(T_W - T_{\text{возд}}) \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от оребренной трубки в поток воздуха,  $T_W$  температура наружной поверхности оребренной трубки.

Последняя величина будет близка к температуре газа в данном сечении трубки в силу того, что коэффициент теплоотдачи газа по внутренней поверхности трубы более чем в 100 раз превышает коэффициент теплоотдачи по воздуху на наружной поверхности даже с учетом ее оребрения. Таким образом, имеем уравнение для изменения температуры газа вдоль труб теплообменника.

$$qC_p \frac{\partial T}{\partial x} = -\alpha(T - T_{\text{возд}}) \quad (3)$$

Коэффициент теплоотдачи по наружной поверхности  $\alpha$  оказывается пропорциональным  $Re^{0,8}$  (см., например, [1]) как для поперечного обтекания цилиндра (в данном случае трубки), так и для продольного обтекания плоской пластины (поверхности оребрения), где  $Re$  – число Рейнольдса.

Поэтому зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости обдува имеет вид

$$\alpha = B \cdot V^\beta \quad (4)$$

где  $B$  – некая константа, показатель степени  $\beta = 0,8$ .

Уравнение (3) легко интегрируется. С учетом (4) для изменения температуры газа вдоль трубки теплообменника получим:

$$T(x) = (T_{\text{вх}} - T_{\text{возд}}) \times \exp\left(-\frac{BV^\beta}{qC_p} x\right) + T_{\text{возд}} \quad (5)$$

Реально практический интерес представляет лишь температура в конце

трубки или на выходе из теплообменника, для которой в соответствии с (5) получим:

$$T_{\text{вых}} = (T_{\text{вх}} - T_{\text{возд}}) \times \exp\left(-A \cdot \frac{q_0}{q} \cdot \left(\frac{V}{V_0}\right)^\beta\right) + T_{\text{возд}} \quad (6)$$

где  $A = (BV_0^\beta l) / (q_0 C_p)$  – константа (характеристика теплообменника),  $l$  – длина трубки,  $q_0$  – номинальный расход газа,  $V_0$  – максимальная (номинальная) скорость обдува при 100% мощности моторов. С учетом того, что скорость потока, создаваемого вентилятором, пропорциональна частоте его вращения, а потребляемая мощность пропорциональна кубу частоты, формулу (6) окончательно можно представить в виде:

$$T_{\text{вых}} = (T_{\text{вх}} - T_{\text{возд}}) \times \exp\left(-A \cdot \frac{q_0}{q} \cdot \left(\frac{N}{N_0}\right)^{\beta/3}\right) + T_{\text{возд}} \quad (7)$$

Где  $N/N_0$  – безразмерная (отнесенная к номинальной) потребляемая мощность привода электродвигателей вентиляторов. Последняя формула определяет зависимость температуры газа в выходном коллекторе АВО при частотном регулировании от потребляемой мощности. Данная зависимость сильно нелинейная и выпуклая вниз в отличие от линейной зависимости при традиционном регулировании отключением части вентиляторов.

На рис. 5 представлены экспериментальные (по результатам измерений в цехе 10 КС 20 Ново-Комсомольского ЛПУ МГ ООО «Газпром Трансгаз Югорск») и расчетные (при  $A = 0,875$  и  $\beta = 0,8$ ) кривые изменения температуры газа в зависимости от потребляемой мощности.

На графике рис. 5 видна значительная экономия электроэнергии при частотном регулировании по сравнению с дискретным регулированием отключением части вентиляторов. Интересно отметить, что при одинаковой величине охлаждения потребляемая мощность при

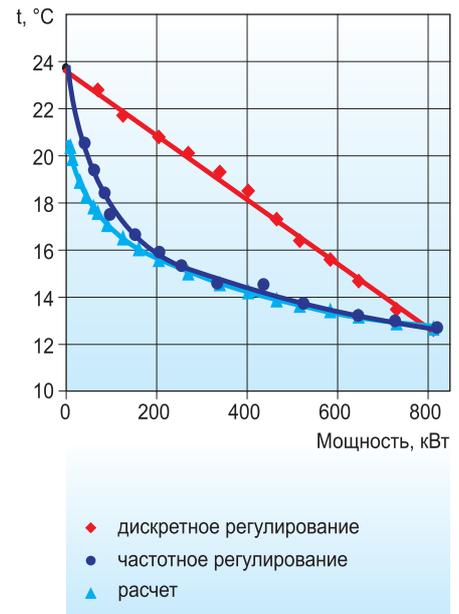


Рис. 5. Потребление электроэнергии АВО газа с традиционным (дискретным) и частотным регулированием в зависимости от температуры газа за ним

частотном регулировании может быть в несколько раз меньше мощности, потребляемой установкой охлаждения газа при традиционном дискретном регулировании.

Столь существенная экономия электроэнергии качественно объясняется тем, что при выключении части вентиляторов фактически выводится из работы и теплообменная поверхность трубного пучка над (или под) остановленными вентиляторами. Напротив, при частотном регулировании вся поверхность трубного пучка всегда остается в работе.

В заключение можно сделать вывод, что внедрение частотно-регулируемых приводов двигателей в теплообменных и вентиляционных системах совместно с современными средствами автоматического регулирования позволяет значительно улучшить эксплуатационные характеристики систем, обеспечить надежную и долговечную работу двигателей и значительно уменьшить потребление электрической энергии.

#### Литература

1. И.А. Прибытков, И.А. Левицкий. Теоретические основы теплотехники. – М.: Академия, 2004.