

УДК 621.512-5

Милованов В.И., д-р техн. наук, проф.,

Балашов Д.А. (ОГАХ, Одесса)

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПОРШНЕВЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ КОМПРЕССОРОВ

Рассмотрены основные принципы регулирования привода поршневых компрессоров, особое внимание уделено плавному регулированию частоты вращения вала компрессора с помощью преобразователей частоты входного напряжения.

Ключевые слова: поршневой компрессор, производительность, привод.

В настоящее время при решении задач регулирования холодопроизводительности компрессоров требуется использовать решения, которые позволяют наиболее экономно использовать электроэнергию. Этим требованиям соответствует регулирование воздействием на привод.

Цели статьи – показать преимущества плавного регулирования частоты вращения вала поршневого холодильного компрессора способом изменения частоты питающего тока; описание и сравнение способов регулировки производительности воздействием на привод.

Регулирование производительности компрессора воздействием на привод не требует усложнения конструкции компрессора и коммуникаций. Воздействуя на привод, можно регулировать производительность путем остановок компрессора и изменения числа оборотов.

Регулирование повторными остановками компрессора характеризуется прерывистым изменением производительности. Его осуществляют двумя способами: остановками двигателя и отсоединениями его от компрессора. Подавляющее большинство поршневых компрессоров приводится в действие от асинхронных короткозамкнутых электродвигателей. В связи с этим рассмотрим способ «пуск – остановка» компрессоров, снабженных только таким типом привода. При электрическом приводе мощностью до 250 кВт допускается регулирование путем остановок двигателя. Запуск и остановку производят управляемые регулятором производительности автоматические пусковые устройства. В зависимости от соотношения между вращающим моментом электродвигателя и моментом сопротивления компрессора различают прямой пуск и пуск с разгрузкой. При прямом пуске вращающий момент электродвигателя больше момента сопротивления компрессора. В этом случае для пуска достаточно выключить электродвигатель. Пуск с разгрузкой применяют, когда возможно превышение момента сопротивления над вращающим моментом электродвигателя. На время пуска искусственно разгружают компрессор, уменьшая момент его сопротивления. Основное преимущество способа регулирования повторными

остановами в том, что при прекращении подачи расход энергии тоже прекращается, следовательно, способ является экономичным.

Регулирование путем отсоединения компрессора от двигателя применяется для двигателей значительной мощности, часто для синхронных. Его преимущества – отсутствуют броски тока при пуске компрессора, двигатель не перегревается при частых включениях. Этот способ менее экономичен, чем регулирование остановками двигателя, так как теряется мощность холостого хода двигателя. В то же время он экономичнее лучших систем регулирования переводом компрессора на холостой ход – в периоды прекращения подачи экономится мощность холостого хода компрессора, составляющая не менее 15% номинальной [2].

Соотношение между вращающим моментом электродвигателя и моментом сопротивления компрессора можно выявить, располагая соответствующими характеристиками. Характеристики электродвигателя показывают изменение вращающего момента при его запуске, когда частота вращения вала компрессора последовательно пробегает от нуля до рабочего значения. Теоретически при отсутствии момента сопротивления частота вращения n стремится к синхронной

$$n_c = 60f/p, \quad (1)$$

где f – частота тока, Гц;

p – число пар полюсов двигателя.

Величина V_h ступени компрессора определяется из уравнения

$$V_h = Fsnz, \quad (2)$$

где V_h – объемная производительность;

S – ход поршня;

F – площадь поршня;

z – число цилиндров.

При постоянном ходе s и площади F поршня изменение V_h можно осуществлять за счет плавного или ступенчатого изменения частоты вращения вала n . Рассмотрим способы воздействия на привод установки с точки зрения требований, предъявляемых к системам регулирования.

При плавном изменении частоты вращения двигателя и коленчатого вала компрессора достигается точность поддержания заданного закона изменения давления.

Если двигатель допускает плавное изменение частоты вращения, то конструкция компрессора не усложняется.

Для оценки затрат работы или мощности при изменении производительности этим способом рассмотрим изменение изотермного КПД $\eta_{из}$ при разных частотах вращения вала n_1 и n_2 , причем $n_1 > n_2$

$$\eta_{из} = \frac{N_{из}}{N_u + N_{тр}}, \quad (3)$$

где $N_{из}$ – изотермная мощность, которая определяется уравнением

$$N_{из} = mRT_n \ln(p_k/p_n), \quad (4)$$

где R , T_n , p_k и p_n – постоянны при обоих режимах работы по условию.

Производительность компрессора:

$$m = \rho_n V_h n \lambda z, \quad (5)$$

где λ – коэффициент подачи.

Найдем зависимость между производительностями компрессора при n_1 и n_2

$$m_2 = m_1 \frac{n_2 \lambda_2}{n_1 \lambda_1}. \quad (6)$$

Тогда

$$N_{2и} = N_{1из} \frac{n_2 \lambda_2}{n_1 \lambda_1}. \quad (7)$$

Индикаторная мощность $N_{и}$ определяется при обработке экспериментальных данных в соответствии с уравнением

$$N_u = kAn, \quad (8)$$

где A – площадь индикаторной диаграммы;

k – масштаб площади диаграммы.

Выразим $N_{2и}$ через $N_{1и}$:

$$N_{2и} = N_{1и} \frac{A_2 n_2}{A_1 n_1}. \quad (9)$$

Мощность, затрачиваемую на преодоление механического трения в механизме движения $N_{2тр}$ при постоянстве коэффициентов трения деталей, можно выразить через $N_{1тр}$:

$$N_{2тр} = N_{1тр} n_2 / n_1. \quad (10)$$

Подставив значение мощностей в уравнение для $\eta_{из}$, найдем

$$\eta_{2из} = \frac{N_{1из} \frac{\lambda_2}{\lambda_1}}{N_{1и} \frac{A_2}{A_1} + N_{1мп}} \quad (11)$$

Проанализируем полученное выражение. Если $A_2/A_1 = 1$ и $\lambda_2/\lambda_1 = 1$, то $n_{1из} = n_{2из}$. При уменьшении частоты вращения вала снижаются средняя скорость поршня и скорость газа в клапанах в отношении n_2/n_1 . Газодинамические сопротивления клапанов уменьшаются в отношении $(n_2/n_1)^2$. Процессы сжатия и расширения осуществляются с меньшими показателями политропы. Вследствие этого отношение $A_2/A_1 < 1$, что указывает на повышение изотермного КПД по мере снижения частоты вращения вала [1].

Отношение λ_2/λ_1 меняется неоднозначно при достаточно широком диапазоне изменения частоты вращения вала. Функция $\lambda = f(n)$ имеет максимум при $n = n_{опт}$. Если $n_1 < n_{опт}$, то уменьшению частоты вращения вала от n_1 , до n_2 соответствует $\lambda_2/\lambda_1 < 1$. При $n_1 > n_{опт}$ и $n_2 < n_1$ величина $\lambda_2/\lambda_1 > 1$. Она достигает максимального значения при $n_2 = n_{опт}$, а затем постепенно снижается и при определенном значении n_2 становится меньше единицы. Таким образом, в зависимости от конструкции рассматриваемого компрессора и величины исходной частоты вращения вала n_1 снижение ее до n_2 может приводить как к повышению (при $\lambda_2/\lambda_1 > 1$), так и к понижению (при $\lambda_2/\lambda_1 < 1$) изотермного КПД компрессора.

Совместное влияние рассмотренных факторов приводит к тому, что в ограниченном диапазоне изменения частоты вращения вала изотермный КПД компрессора меняется незначительно. На изменение КПД сильно влияет выбор клапанов, которые должны иметь наибольшую эффективность в диапазоне предполагаемого изменения частоты вращения вала.

Синхронные электродвигатели имеют жесткую характеристику и не допускают изменения частоты вращения ротора. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, которые наиболее часто применяются для небольших компрессоров из-за своей дешевизны, также имеют жесткую характеристику. Изменение частоты вращения их роторов соответствует величине скольжения (2%), а это ничтожно мало. Асинхронные двигатели с фазным ротором при включении сопротивлений в цепь статора допускают в ограниченном диапазоне изменение частоты вращения, но работают на этих режимах неэкономично. Только электродвигатели постоянного тока имеют мягкую характеристику. На промышленных предприятиях, как правило, нет постоянного тока, а двигатели, питаемые от выпрямителей, сложны в эксплуатации, имеют большие энергетические потери и дороги.

Общий КПД установки зависит от состояния компрессора и двигателя. Обосновывая допустимый диапазон изменения частоты вращения вала, обычно исходят из посылки, что КПД установки должен быть примерно постоянным. В некоторых случаях между электродвигателем и компрессором устанавливается гидромурфта, которая позволяет плавно изменять частоту вращения вала ком-

прессора. Это удорожает установку и ухудшает ее КПД, но дает возможность регулировать работу компрессора.

В последнее время находит применение ступенчатое изменение частоты вращения вала для целей регулирования давления в сети. Простейшим случаем использования такого способа является остановка двигателя, т. е. двигатель имеет две возможные частоты вращения вала – рабочую и нулевую. Применение такого регулирования обосновано только тогда, когда компрессор имеет производительность m больше, чем потребление газа сетью m_{ct} , а технологический процесс предприятия допускает изменение давления в сети от p_{max} до P_{min} .

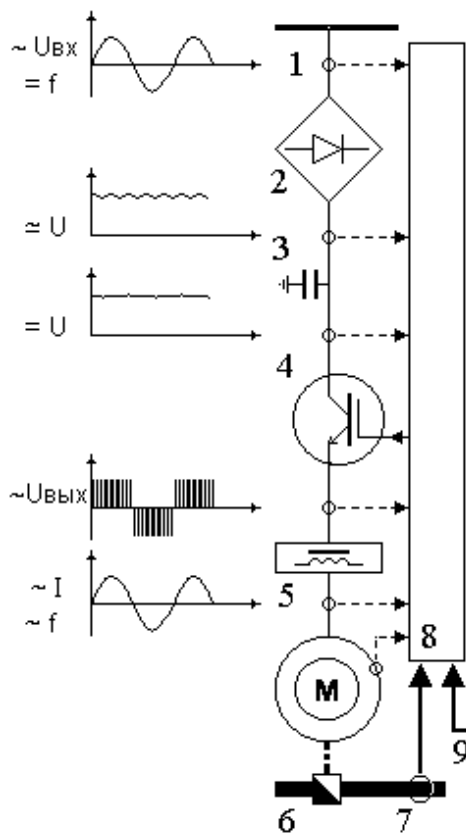
Регулирование изменением числа оборотов осуществляют без специальных регулирующих органов в конструкции компрессора. Понижение производительности многоступенчатого компрессора не вызывает перераспределения отношения давлений между ступенями и потому регулирование можно производить в широких пределах. Данный способ изменения холодопроизводительности предполагает наличие у компрессора регулируемого привода, т. е. привода, имеющего приспособления для изменения частоты вращения вала. В подавляющем большинстве поршневые компрессоры приводятся в действие асинхронными электродвигателями переменного тока. Поэтому ниже будут рассмотрены некоторые схемы с изменением частоты вращения валов компрессоров с этим типом привода. В зависимости от видов применяемых электроприводов различают позиционное и плавное изменение частоты вращения вала компрессора.

1. Метод позиционного изменения частоты вращения осуществляют с помощью двух- или многоскоростных асинхронных короткозамкнутых электродвигателей. При заданной частоте питающего тока частота вращения зависит от числа пар полюсов электродвигателя. Если предположить, что холодопроизводительность регулируемого компрессора линейно зависит от частоты вращения вала электродвигателя, то выбор ступеней регулирования сводится к подбору электродвигателя с нужным числом пар полюсов. Так, четырехскоростной электродвигатель с синхронными частотами вращения 1500, 1000, 750 и 500 об/мин обеспечивает ступени производительности 1, $\frac{2}{3}$, $\frac{1}{2}$ и $\frac{1}{3}$ от максимальной. Следует учитывать, что с ростом числа ступеней резко усложняется электродвигатель, увеличивается число обмоток статора, подлежащих коммутации, и число пускателей, возрастают размеры и масса электродвигателя, усложняются схемы управления и ухудшаются энергетические показатели электродвигателя. Допустимая частота переключений ступеней в данной системе невелика, что связано с износом коммутационной аппаратуры и дополнительным нагревом двигателя.

2. Регулируемый асинхронный электропривод или частотно-регулируемый привод состоит из асинхронного электродвигателя и инвертора (преобразователя частоты), который выполняет роль регулятора скорости вращения асинхронного электродвигателя.

Основным элементом этой схемы, как видно на рисунке 1, является преобразователь частоты ПЧ, который получает энергию от сети промышленной

частоты и под действием управляющего сигнала изменяет частоту на выходе в заданных пределах. Ток от преобразователя частоты питает обмотку статора электродвигателя Д. Частота вращения пропорциональна частоте питающего тока. Питание от сети осуществляется через пускатель П и кнопку Кн.У. Управляющий сигнал от регулирующего прибора РП проходит через устройство УУ, управляющее преобразователем частоты [3].



1 – питающая сеть; 2 – выпрямитель; 3 – постоянное напряжение; 4 – инвертор; 5 – ВЧ фильтр; 6 – привод; 7 – датчик; 8 – система управления ЧРП; 9 – внешняя система управления.

Рисунок 1 – Схема с изменением частоты питающего тока

Из питающей сети (1) переменное напряжение промышленной частоты ($\sim U, = f$) поступает на вход выпрямителя (2). Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения на выходе выпрямителя устанавливается фильтр (3). И уже постоянное ($= U$) (сглаженное) напряжение подаётся на вход управляемого импульсного инвертора тока (4). Электронные ключи инвертора по сигналам системы управления (8) открываются и запираются таким образом, что формируемые при этом различные по длительности импульсы тока складываются в результирующую кривую синусоидальной формы с необходимой частотой. Для сглаживания пульсаций на выходе инвертора может устанавливаться дополнительный высокочастотный фильтр (5). Затем напряжение подаётся на обмотки электродвигателя (М), который является приводом компрессора (6). Подлежа-

ший регулированию параметр технологической системы измеряется датчиком (7), управляющий сигнал от которого подаётся в систему управления ЧРП (8), либо внешняя система управления (9) собирает информацию о параметрах, характеризующих работу компрессорного агрегата, обрабатывает её и подаёт результирующий сигнал в систему управления приводом.

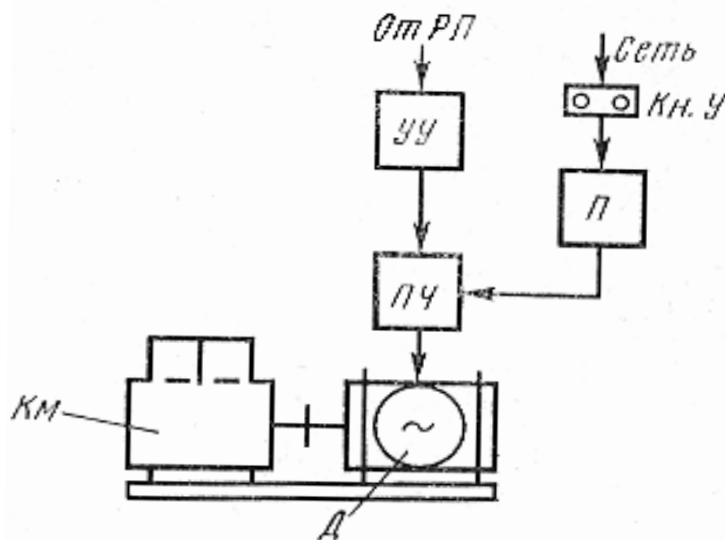


Рисунок 2 – Состав элементов частотно регулируемого электропривода

Преобразователь частоты, как показано на рисунке 2 – это устройство, преобразующее входное напряжение 220В/380В частотой 50Гц, в выходное импульсное напряжение посредством ШИМ (широтно-импульсной модуляции), которое формирует в обмотках двигателя синусоидальный ток частотой от 0Гц до 400Гц или даже до 1600Гц. Таким образом, плавно увеличивая частоту и амплитуду напряжения, подаваемого на обмотки асинхронного электродвигателя, можно обеспечить плавное регулирование скорости вращения вала электродвигателя.

В зависимости от программных установок, величины и скорости изменения этого сигнала микропроцессорная система управления ЧРП формирует и подаёт управляющие импульсы на электронные ключи выпрямителя и инвертора. Для самоконтроля и защиты система управления собирает и обрабатывает сигналы о наличии или величине ряда параметров, характеризующих работу собственных подсистем. Контролируются токи и напряжения на входе, выходе из преобразователя и в магистрали постоянного тока. Измеряется температура элементов и регулируется производительность системы охлаждения преобразователя. Контролируется состояние отдельных элементов вплоть до отдельного ключа. При наличии специального датчика в корпусе электродвигателя измеряется, а при отсутствии датчика рассчитывается по электрическим характеристикам потребляемой двигателем энергии температура двигателя. Применение в преобразователе частоты и управляющем устройстве полупроводниковых элементов позволяет выполнять их в сравнительно небольших габаритах и небольшой массы. Однако, несмотря на это, данный метод является достаточно

сложным и дорогостоящим. Поэтому использование его должно быть экономически обосновано.

Выводы

Использование преобразователей частоты питающего тока для регулирования поршневых холодильных компрессоров является наиболее перспективным способом. Регулирование изменением частоты вращения вала, пока еще не общепринятое для поршневых компрессоров, при широком использовании даст значительную экономию энергии. Регулируемый компрессор требует меньшего числа включений из-за своего последовательного запуска. Механизм «частотника» регулирует давление нагнетания с высокой точностью (погрешность до 0,1 бар) и сразу же отвечает изменениям давления в сети. В этом и заключается экономия электроэнергии, так как с каждым лишним баром давления нагнетания электропотребление возрастает на 6-8% процентов. При данном способе регулирования производительности компрессора достигается экономия потребляемой энергии в пределах до 25-30% в сравнении с другими способами регулирования (дресселирование, включение/отключение и пр.). Регулирование производительности изменением частоты питающего тока снижает износ механических звеньев и увеличивает срок службы технологического оборудования вследствие улучшения динамики работы электропривода.

Вышесказанное свидетельствует о целесообразности широкого внедрения данного метода регулирования производительности компрессоров в современное производство и эксплуатацию компрессорной техники.

Литература

1. Поршневые компрессоры / Б. С. Фотин [и др.] – СПб. : Машиностроение, 1987. – 372 с.
2. Компрессорные машины / К.И. Страхович [и др.]; под ред. Н.Г. Николаевой. – М. : Гос. изд-во торгов. лит., 1961. – 600 с.
3. Ужанский, В. С. Автоматизация холодильных машин и установок / В. С. Ужанский. – М. : Лег. и пищ. пром-сть, 1982. – 304 с.