



EMERSON
Climate Technologies

Copeland®

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ СПИРАЛЬНЫХ КОМПРЕССОРОВ

■ Г.Ф. Ханди, Copeland Europe

Спиральные компрессоры получают все большее распространение на рынках стран СНГ. Многие вопросы, связанные с конструкцией, преимуществами, особенностями эксплуатации, уже рассматривались на страницах «Холодильного бизнеса» и другой специализированной литературы. Сегодня мы хотели бы ответить на часто задаваемый вопрос: «Каким образом можно регулировать производительность в системах на базе спиральных компрессоров?»

Необходимость в регулировании производительности

Хорошо известно, что большинство холодильных систем и установок кондиционирования воздуха работают с неполной производительностью, причем большую часть периода своей эксплуатации. Рассмотрим простой пример компрессорно-конденсаторного агрегата, предназначенного для обеспечения постоянной работы системы с нагрузкой 10 кВт, при температурах кипения - минус 10°C и окружающей среды - плюс 32°C.

Температура конденсации при этих условиях +45°C. Эти исходные данные показаны на **рис.1**. Допустим, установка работает на юго-востоке Англии, для которой даны диаграммы средних ежемесячных температур и соответствующих им температур конденсации. При каждом из двенадцати средних значений окружающих температур производительность находится между 11,5 и 14 кВт (конденсатор соответствует по производительности компрессору), как показано на **рис. 2**. Количество рабочих часов при температуре окружающей среды +32°C будет очень небольшим, если оно вообще будет. Большинство рабочих часов от агрегата потребует производительность 70-85%.

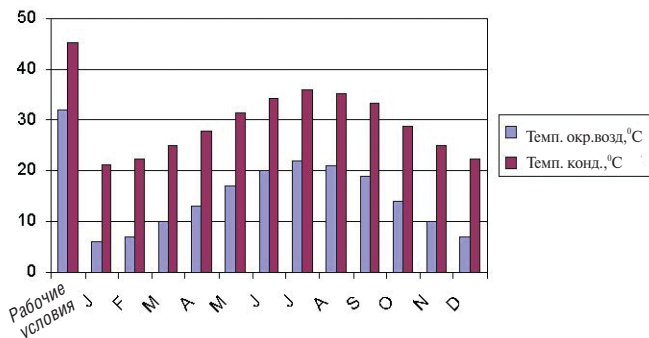


Рис.1. Среднемесячные температуры окружающей среды (район юго-восточной Англии) и температуры конденсации для компрессорно-конденсаторного агрегата со спиральным компрессором, предназначенного для работы с постоянной нагрузкой, при +32°C окружающей среды и +45°C конденсации

Во многих случаях нагрузка также будет зависеть от окружающей среды. Пример: нагрузка, изменяющаяся пропорционально разнице между окружающей температурой и температурой в охлаждаемом помещении. При требуемой постоянной температуре в помещении 0°C нагрузки для каждой среднемесячной температуры легко вычисляются от исходной точки с расчетными условиями: +32°C окружающей среды, нагрузка 10 кВт. Эти ежемесячные нагрузки наряду с холодопроизводительностью компрессора и потребляемой мощностью (см. **рис. 2**) представлены на **рис. 3**. В этом примере при окружающей температуре

+5°C (средняя температура января) производительность компрессорно-конденсаторного агрегата составит 14 кВт, хотя необходимая нагрузка будет только 2 кВт. Нагрузки на системы кондиционирования зачастую бывают вообще сезонными.

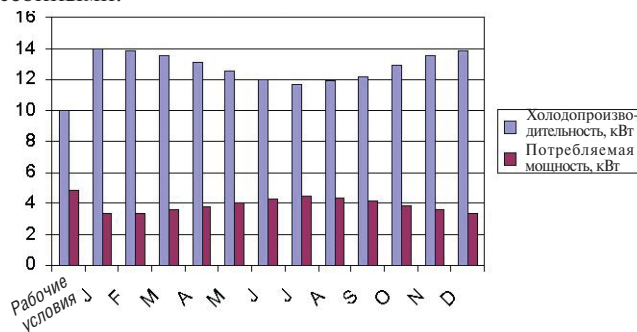


Рис.2. Производительность и потребляемая мощность компрессорно-конденсаторного агрегата со спиральным компрессором для условий на рис.1.

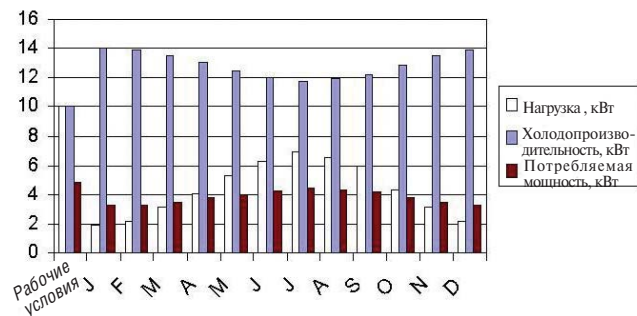


Рис.3. Производительность и потребляемая мощность компрессорно-конденсаторного агрегата со спиральным компрессором для условий на рис.1 и холодильные нагрузки, зависящие от окружающей среды

В некоторых случаях требуется непрерывная работа компрессора во всем диапазоне производительности и условий эксплуатации. Примеры: прецизионные системы кондиционирования воздуха или холодильные системы с точным поддержанием температуры. Многоиспарительные VRV-системы и даже некоторые системы с отдельным испарителем требуют непрерывной работы компрессора во избежание даже временного отклонения от заданной температуры или понижения влажности (усушки), которые происходят во время работы с периодическим включением и отключением. В некоторых ситуациях это приводит к использованию очень неэффективных систем байпасирования горячего газа, а в комфортном охлаждении, особенно в Азии, очень широкому распространению инверторных систем.



Методы регулирования производительности для спиральных компрессоров

Периодическое включение / отключение

Некоторые системы имеют достаточную тепловую инерцию, позволяющую одному компрессору нормально работать в режиме периодического включения и отключения. Очевидный пример - работа домашнего холодильника. В системах, требующих поддержания температуры на определенном уровне, всегда будут наблюдаться некоторые ее колебания. И чтобы температура находилась в допустимых пределах, иногда требуется пускать и останавливать компрессор до нескольких раз в час.

Отдельный компрессор обеспечивает очень хорошее решение для систем, где допускается или необходимо изменение температуры кипения.

К примеру, в молокоохладителе компрессор может непрерывно работать до достижения заданной температуры окончания охлаждения.

Несколько компрессоров

Несколько компрессоров - самый обычный путь сглаживания колебаний, возникающих в результате ступенчатого изменения производительности, при использовании спиральных компрессоров. Холодильные станции из нескольких компрессоров применяются много лет в системах для супермаркетов, сначала с поршневыми компрессорами, а теперь также и со спиральными. В крупных поршневых компрессорах ступенчатое регулирование производительности обычно достигается посредством разгрузки цилиндров. В спиральных станциях используются меньшие компрессоры, что обеспечивает большую гибкость [1]. В кондиционировании воздуха очень широко применяется спиральный «Тандем» (рис.4).



Рис. 4. Установка Тандем со спиральными компрессорами для кондиционирования воздуха

Эти установки имеют невысокий уровень сложности в изготовлении и доступную стоимость благодаря использованию испытанной конструкции линии уравнивания масла, не требующей специального дополнительного контроля. Для холодильных станций обычным методом маслообеспечения является оснащение общим маслоотделителем и регуляторами уровня масла для каждого компрессора. Однако недавние испытания подтвердили, что холодильные установки в составе до трех спиральных компрессоров включительно, во многих случаях (но не всегда

!!!), могут работать с очень простой линией уравнивания масла (рис.5).

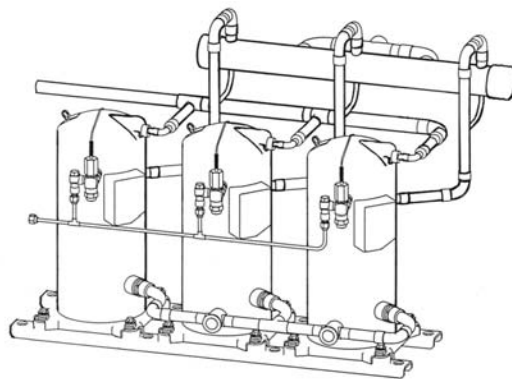


Рис. 5. Трехкомпрессорная холодильная установка с простой линией уравнивания масла

Спиральный компрессор с двух-ступенчатым регулированием

Регулирование производительности спирального компрессора может быть обеспечено открытием байпасного канала, позволяющего газу низкого давления циркулировать без сжатия. При этом эффективный рабочий диаметр и угол закручивания профиля спирали уменьшаются. Принцип уменьшения объема всасывания используется много лет в винтовых компрессорах и хорошо известен. В спиральных компрессорах для этого применяются порты байпасирования (рис. 6). На рис. 7 в разрезе показано расположение байпасных отверстий в неподвижной спирали, обеспечивающих возврат газа из камеры сжатия в область низкого давления.

В режиме полной рабочей нагрузки необходимо полное закрытие байпасных каналов. При этом отверстия, соединяющие их с полостями сжатия, должны иметь размер и конфигурацию, которые минимизируют любую возможность перетекания газа из одной полости спирального блока в другую. В режиме частичной нагрузки объем байпасного потока должен быть достаточным для полной разгрузки начального участка спиралей. В ранних разработках использовался внешний соленоидный клапан и небольшие плунжерные клапаны для перекрытия каналов, а клапаны активизировались давлением нагнетаемого газа. Последняя конструкция имеет подвижное регулирующее кольцо, которое плотно перекрывает проходы при включении встроенного соленоидного клапана, как показано на рис. 8. При отключении соленоида пружина возвращает кольцо в разгруженное положение.

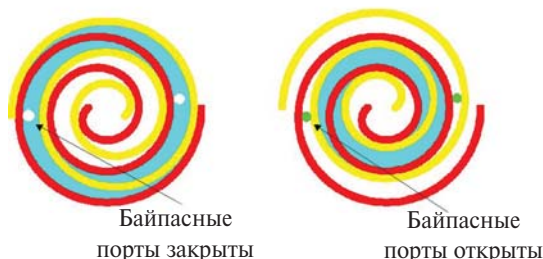


Рис. 6. Двухступенчатое регулирование производительности за счет уменьшения рабочего угла закручивания спирали при частичной нагрузке

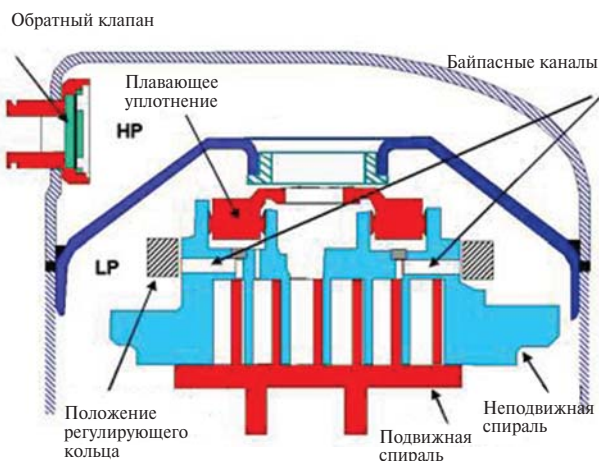


Рис. 7. Разрез спирального блока с двух-ступенчатой модуляцией: показана конфигурация байпасных каналов

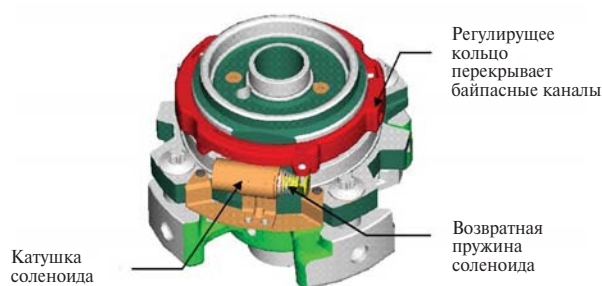


Рис. 8. Спиральный блок Copeland с двухступенчатой модуляцией в сборе

Для поддержания постоянной степени сжатия размер нагнетательного окна должен быть уменьшен. Однако система кондиционирования воздуха с одним компрессором, работающая с пониженной производительностью, испытывает и изменение температуры конденсации. Оба эти действия вызывают уменьшение влияния окружающей среды на изменение нагрузки и эффективное увеличение размеров конденсатора. Уменьшение сжатия без модификации нагнетательного окна вполне удовлетворяет этим условиям работы и обеспечивает очень хорошую эффективность системы при полной и частичной нагрузке.

Этот ступенчатый метод регулирования производительности имеет преимущества перед таким методом, как применение двухскоростных двигателей. Система управления проста и не требует дополнительного контактора. Непрерывная работа на постоянной скорости обеспечивает нормальную смазку, как при полном, так и частичном режимах нагрузки. Переход с одного на другой режим происходит без остановки. Лабораторные испытания двухступенчатых моделей на R410A продемонстрировали такой же холодильный коэффициент, как и для стандартного спирального компрессора на R410A, при температуре конденсации 32°C. Положение портов байпасирования спроектировано для обеспечения 67% производительности при частичной нагрузке.

Но, обратите внимание, что в настоящее время Copeland не планирует предлагать двухступенчатый компрессор на европейском рынке.

Спиральный компрессор с переменной скоростью вращения привода (питание с помощью инвертора)

Часто возникает вопрос, почему бы не обеспечить движение спирали с переменной скоростью для целей регулирования производительности. Однако механизм радиального согласования, описанный в источнике [2], оптимизирован для ограниченного диапазона скорости. Если некоторое превышение скорости допустимо, то работа на низкой скорости может закончиться разъединением спиралей, потому что совместно с радиальным согласованием (оно подразумевает некоторую степень свободы в траектории движения подвижной спирали) центробежная сила обязана поддерживать уплотнение между боковыми поверхностями спиралей. Спирали, имеющие определенный орбитальный радиус, при котором подвижная спираль приводится в действие движением эксцентрика, в принципе, могут работать при пониженной скорости. Но не стоит забывать также про механизм смазки потому, что масло должно полноценно поступать в подшипники при всех скоростях вала.

В прошлом Copeland создал спиральные компрессоры с переменной скоростью, имевшие необходимые характеристики для гарантированно надежной работы в диапазоне скорости при 30-100 Гц. Они были предназначены только для определенных областей применения в кондиционировании воздуха. Как показано на рис. 9, принципиальными отличиями были: масляный насос и изменения в механизме согласования, приспособленном к широкому диапазону скорости. Схема подачи масла также была несколько пересмотрена вследствие больших изменений в количестве поступающего масла. Двигатель был разработан для работы с инвертором до 100 Гц. Рабочий диапазон полученного в итоге компрессора показан на рис. 10. Видно, что в условиях малых скоростей ротора допустимый рабочий диапазон, в принципе, соответствует определенным требованиям системы кондиционирования воздуха.

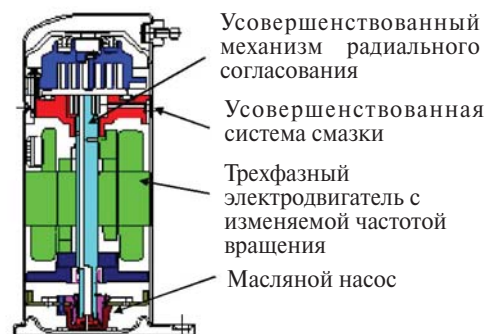


Рис. 9. Разрез спирального компрессора Copeland с изменяемой скоростью вращения ротора

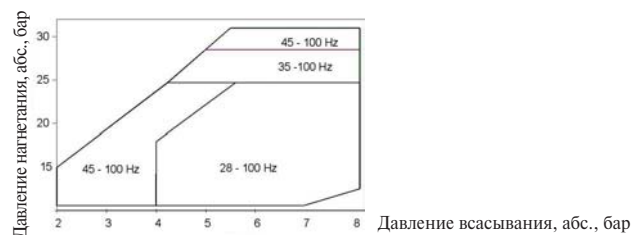


Рис. 10. Спиральный компрессор с изменяемой скоростью вращения: типовые рабочие диапазоны для R407C



Но такой компрессор в сочетании с инвертором не был привлекателен с коммерческой точки зрения, и, как следствие, не был запущен в серийное производство и не представлен сейчас на рынке.

Цифровой спиральный компрессор (PWM Модуляция)

Цифровой спиральный компрессор - это достаточно простая идея, возникшая благодаря особенности осевого согласования. Она позволяет верхней (условно неподвижной) спирали перемещаться вверх на очень маленькое расстояние в осевом направлении и всегда гарантировать легкое соприкосновение спиралей. При цифровом управлении разделение между спиральями по оси составляет приблизительно 1мм и позволяет компрессору работать на полной скорости без сжатия и циркуляции газа. Двигатель работает и приводит в движение подвижную спираль, но производительность при этом равна нулю (т.е. спиральный блок механически полностью разгружен). При переключении в нормальный режим спиральи соприкасаются обратно, и работающий компрессор ведет себя точно так же, как и обычный спиральный, обеспечивая 100%-ную производительность. Модуляция производительности достигается чередующимися подъемами неподвижной (верхней) спирали и ее возвращениями в соприкосновение с подвижной (нижней) спиралью. Управляет такими перемещениями пульсирующий сигнал с модулируемой шириной PWM (Pulse Width Modulation), **рис. 11**. При этом чем дольше спиральи разъединены в течение рабочего периода цикла, тем меньше производительность компрессора. Поскольку вал при таком регулировании производительности непрерывно вращается со 100%-ной скоростью, то всегда обеспечивается полноценная смазка.

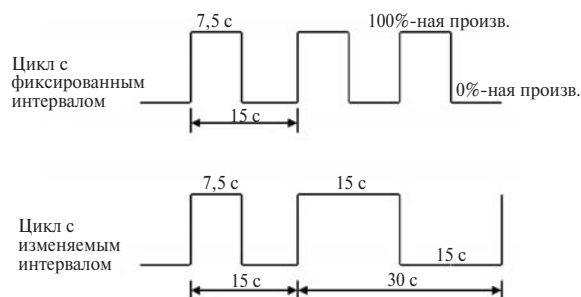


Рис.11. Два примера PWM сигнала для 50%-ного режима. Период цикла может варьироваться с целью оптимизации для специфических применений

Период времени полной последовательности «одно включение (разъединение спиралей) / одно отключение (обратное соединение)», или период цикла, могут составлять от 15 до 30 секунд. Продолжительность соединения должна быть не менее 2 секунд, чтобы переходное время к полностью нагруженному состоянию спирали составляло относительно небольшую часть всего времени работы со 100%-ной нагрузкой. Схематическое изображение на **рис. 12** иллюстрирует принцип действия механизма регулирования производительности. В верхней части крышки корпуса установлен поршень, жестко соединенный с верхней спиралью. Он, при необходимости, приводится в действие низким давлением. На верхнем рисунке мы видим разгруженное состояние, при котором камера модуляции над поршнем сообщается с линией всасывания через трубо-

провод при открытом соленоидном клапане. Разность давлений с разных сторон поршня вынуждает его перемещаться вверх, поднимая при этом верхнюю спираль. В нагнетательном порте спирального блока установлен динамический нагнетательный клапан, подобный тому, что используется в холодильном спиральном компрессоре. Он предотвращает возврат газа высокого давления в полости спиралей при разгруженном состоянии. При закрытии соленоидного клапана, как показано на нижнем рисунке, давление в камере модуляции возрастает до давления нагнетания, и поршень вместе с верхней спиралью возвращается в свое нормальное (нижнее) положение. Для ускорения возрастания давления в камере модуляции в поршне имеется небольшой перепускной канал. По достижении нормального контакта между верхней и нижней спиральями полное согласование и 100%-ная производительность восстанавливаются.

Заметьте, что хотя имеется небольшое перетекание газа со стороны высокого на сторону низкого давления при каждом цикле через внешний трубопровод с соленоидным клапаном, это не является байпасом в обычном смысле этого слова.

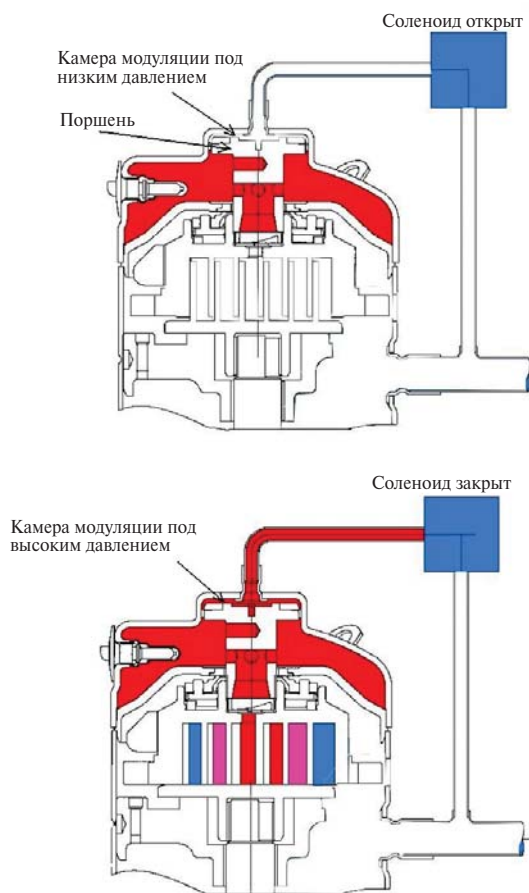


Рис.12. Механизм регулирования производительности цифрового спирального компрессора

К сожалению, из-за большого объема статьи мы вынуждены разделить ее на 2 части. Вторая часть статьи будет опубликована в следующем номере.