

УДК 621.592. 2: 62 – 52

Замкнутая дроссельная микрокриогенная система, адаптирующаяся к внешним условиям и режиму работы

В.Г. СЕМЕНОВ, В.М. ЕРМАКОВ,
канд. техн. наук А.Г. ВИНОКУРОВ
ООО «НТК Криогенная техника», г. Омск

Results of the development of a closed-loop throttle microcryogenic system capable of automatically driving its refrigerating capacity towards environmental conditions through regulating the compressor shaft rotational speed are presented. These environmental conditions determine the system thermal load and the specific heat of its cryogenic agent, as well as the operating mode – both in starting and steady-state conditions.

The data given show a several-times decrease of the system power consumption in steady-state conditions, significant increase in life and reduction of weight and overall dimensions.

Problems related with ensuring the quality of regulation processes – i. e. reduction of transient process time, vibration amplitude are discussed, ways to solve them are given.

Замкнутые дроссельные микрокриогенные системы (ЗДМКС) отличаются рядом достоинств и занимают прочные позиции в микрокриогенной технике. Однако резервы их совершенствования не исчерпаны. Так, современные системы не обладают адаптационными свойствами к изменению условий рабочего процесса: режиму работы, температуре окружающей среды T_{oc} , тепловой нагрузке, которые во время эксплуатации могут изменяться в широких пределах. Они проектируются на наиболее тяжелый, пусковой режим работы в условиях максимальной температуры окружающей среды. В менее тяжелых условиях эксплуатации ЗДМКС имеют завышенное энергопотребление и заниженный ресурс при большом избытке производимого холода.

Некоторая адаптируемость параметров в современных системах достигается в результате форсированной работы компрессора в пусковой период [1] за счет увеличения количества заправляемого в систему криоагента. Давление на его входе при запуске и производительность увеличиваются, обеспечивая быстрое охлаждение объекта до промежуточной температуры при пониженных степени сжатия и энергопотреблении. При температуре, близкой к заданной для криостатирования, избыток криоагента автоматически отводится из контура циркуляции в буферную емкость. Давление в обратном потоке и соответственно температура в испарителе снижаются. Система перестраивается с пускового режима на стационарный. Вследствие разгрузки компрессора и его электропривода несколько снижается энергопотребление.

Более эффективным способом адаптации ЗДМКС к условиям работы является автоматическая подстройка частоты вращения вала компрессора [1]. Для быстрого охлаждения объекта до заданной температуры в

пусковой период частота вращения и соответственно холодопроизводительность системы поддерживаются максимальными. Затем по сигналу от датчика температуры из зоны криостатирования они снижаются и в дальнейшем автоматически поддерживаются по отключению температуры от заданного значения на минимальном уровне в зависимости от внешних условий. Система работает как регулятор температуры при максимальном увеличении по сравнению с нерегулируемой ресурса и снижении энергопотребления, что наглядно иллюстрируют данные испытаний макета системы при работе его в режиме криостатирования объекта с теплопритоком 1,2 Вт, при температуре 78 К (см. таблицу). Такое же улучшение ожидается и по ресурсным показателям.

Сложнее было достигнуть снижения массы и габаритов системы в связи с появлением в ее составе нового узла – блока регулирования частоты вращения. До настоящего времени это сдерживало разработку регулируемых систем.

$T_{oc}, ^\circ C$	Потребляемая мощность, Вт (система регулируемая)	$T_{oc}, ^\circ C$	Потребляемая мощность, Вт (система регулируемая)
60	77 + 20 *	25	52
50	65 + 20 *	7	45
35	57	0	36

Примечание. Мощность нерегулируемой системы 270 – 290 Вт с учетом 60 Вт, потребляемых вентиляторами;

* 20 Вт – мощность, потребляемая вентиляторами, которые обдувают компрессор и включаются автоматически, по мере необходимости.

В последнее время в связи с совершенствованием отечественной элементной базы и разработкой более прогрессивных схемных решений блока регулирования частоты вращения вала электропривода появились перспективы уменьшения его массы и габаритов.

Кроме того, снижение средней интенсивности работы движущихся узлов компрессора в регулируемой системе, например подшипников качения, позволило при проектировании использовать облегченные по сравнению с нерегулируемой системой варианты узлов.

Существенное снижение частоты вращения вала компрессора сделало допустимым кратковременное ее увеличение в пусковом режиме без ущерба надежности системы. Это позволило уменьшить размеры полостей сжатия при сохранении необходимой производительности компрессора.

Применение более высокооборотного электродвигателя привело к уменьшению его массы и габаритов, а за счет использования высокоэффективной электротехнической стали 49К2ФА получено их дополнительное снижение.

Снижение тепловыделений в компрессоре в связи с понижением интенсивности работы позволило существенно уменьшить массу, габариты и энергопотребление обдувающих компрессор электровентиляторов. Они включаются по мере необходимости, автоматически, по сигналу от датчика температуры, установленного в компрессоре.

В регулируемой системе существенно снизилась нагрузка на фильтр 2 (рис.1) вследствие уменьшения в потоке продуктов износа компрессора и снижения количества циркулирующего через фильтр хладагента. Это позволило в 2 раза уменьшить объем фильтра и соответственно емкости 6.

При выборе схемы системы необходимо было обеспечить:

требуемое быстродействие в пусковой период при минимальном увеличении массы и габаритов системы и при ее максимальной энергетической эффективности;

высокое качество регулирования, а именно минимальную продолжительность переходных процессов при малой амплитуде колебаний, исключение возможности возникновения автоколебаний.

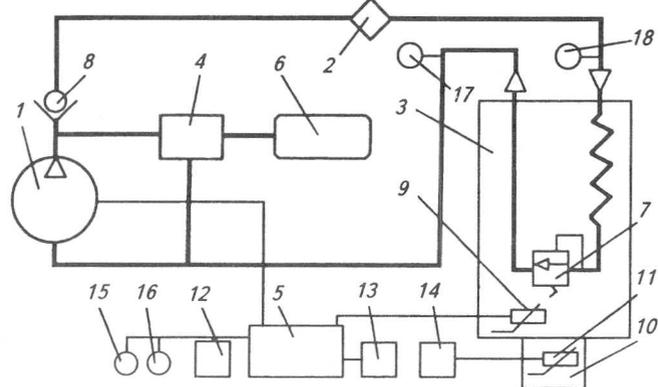


Рис. 1. Принципиальная схема ЗДМКС

В регулируемой ЗДМКС необходимое быстродействие в пусковой период может быть обеспечено только в результате увеличения частоты вращения вала компрессора без применения вышеописанного традиционного форсирования его работы за счет увеличения давления всасывания. Но тогда утрачивается выигрыш от понижения степени сжатия в этот период, что существенно снижает эффективность работы компрессора, увеличивает его массу и габариты. Кроме того, за счет роста частоты вращения в пусковой период диапазон регулирования значительно расширяется, что затрудняет получение высокого КПД электропривода во всем диапазоне и вызывает рост массы электродвигателя. Поэтому использовали комбинированную схему форсирования.

В результате этого и применения современной элементной базы и материалов масса разрабатываемой системы снизилась на 15 % по сравнению с массой нерегулируемой ЗДМКС, несмотря на введение в состав блока регулирования частоты вращения вала электропривода. Существенно уменьшились и габариты.

На рис. 1 изображена принципиальная схема ЗДМКС, включающая компрессор 1, фильтр 2, микротеплообменник (МТО) 3, блок автоматического регулирования давления (БАРД) 4, блок управления (БУ) 5, буферную емкость 6. В отличие от традиционной схемы дроссельное устройство 7 выполнено в виде регулятора давления «до себя», а БАРД 4 подсоединен вместо 1-й ступени компрессора к его выходу. Он дополнительно наделен функцией сброса давления нагнетания при остановке системы для разгрузки выпускного клапана компрессора и подготовки его к повторному запуску. Время подготовки, как правило, жестко ограничивается техническим заданием, поэтому в схему дополнительно включен обратный клапан 8, отсекающий от БАРДа при остановке компрессора основную часть хладагента высокого давления, что значительно ускоряет разгрузку выпускного клапана компрессора.

Система работает следующим образом: перед запуском напряжение подается в БУ 5 и в БАРД 4, емкость 6 подключается к линии обратного потока с помощью электромагнитного клапана, встроенного в БАРД, а от прямого потока тем же клапаном отсекается. После включения системы и заполнения хладагентом линий прямого потока до достижения давления, заданного в дроссельном регуляторе 7, он открывается, и в дальнейшем поддерживает заданное давление прямого потока. При достижении промежуточной температуры окончания режима повышенного давления на входе в компрессор по сигналу от датчика температуры 9 электромагнитным клапаном БАРДа 4 отключается емкость 6 от линий обратного потока. Через встроенный в БАРД пневморегулятор емкость 6 подключается к линии прямого потока, и избыток хладагента отводится в нее из циркуляционного контура. Давление в обратном потоке и температура криостатирования сни-

жаются до заданных значений. Система выходит на заданный температурный режим, и частота вращения вала компрессора по сигналу от датчика температуры 9 снижается и в дальнейшем автоматически поддерживается на минимальном уровне, обеспечивая наиболее экономичный режим ее работы. При этом оптимальное давление прямого потока стабильно поддерживается дроссельным регулятором 7 независимо от производительности компрессора. Тем самым достигается наиболее оптимальное соотношение его КПД с удельной холодопроизводительностью криоагента.

Наиболее сложной оказалась проблема обеспечения высокого качества регулирования, т.е. минимальной продолжительности и амплитуды колебаний в переходных процессах, исключения возможности возникновения автоколебаний. Это особенно важно для авиационных систем, где в условиях высоких скоростей и быстрых эволюций в пространстве резко изменяются тепловая нагрузка на ЗДМКС, внешняя температура и соответственно термодинамика дроссельного цикла, что может вызвать отклонение системы от режима.

Сложность проблемы усугубляется необходимостью обеспечения качественного регулирования не только температуры, но и частоты вращения вала компрессора. Длительные колебания при большой амплитуде приводят к снижению КПД электропривода, ресурса и виброшумовых характеристик системы.

В ходе испытаний установлено, что качественное регулирование связано с оптимизацией конструкции МТО. Любая система регулирования (СР), предназначенная для устранения влияния внешних воздействий на регулируемую величину, имеет внутренние помехи, исходящие от элементов системы [2]. Для их уменьшения в СР обычно вводятся дополнительные элементы – фильтры, стабилизаторы и т.д. В разрабатываемой СР основные внутренние помехи связаны с процессами, протекающими в МТО. Роль же стабилизатора наряду с прямыми функциями играет дроссель-регулятор 7 (см. рис. 1), который устраняет колебания давления при регулировании расхода криоагента.

Но с расходом связана и динамика тепломассообменных процессов в двухфазном потоке криоагента в МТО. Область двухфазного потока многокомпонентных криоагентов, которые используются в современных системах, занимает значительную часть теплообменной поверхности МТО. Диапазон изменения расхода при эксплуатации регулируемой системы очень широк. Пусковой расход может превышать стационарный в десятки раз. Гидродинамический режим течения при этом может изменяться от мелкодисперсного с распыленной жидкой фазой до расслоенного с отдельным или клочкообразным, беспорядочным течением фаз при малых расходах [3]. Теплоотдача в паровую фазу существенно отличается от теплоотдачи в кипящую жидкость, и возможны резкие скачки температуры потока. Регулирование температуры усложняется, если в такой зоне течения оказывается датчик температуры СР. Разни-

ца коэффициентов теплообмена с отдельными фазами, случайный характер контакта с датчиком дополнительно дестабилизируют регулирование.

Экспериментальные исследования проводились на стенде, собранном на базе схемы ЗДМКС, которая дополнена приборами 12 – 18 (см. рис.1). В охлаждаемой массе 10 установлен датчик температуры 11. Быстродействующими самопишущими потенциометрами 12, 13, 14 регистрируются частота вращения вала компрессора, температура в МТО и в охлаждаемой массе соответственно. Для упрощения регулирования частоты вращения вала компрессора используется электродвигатель постоянного тока. Стрелочными приборами 15, 16 измеряются ток и напряжение регулируемого питания, а 17, 18 – давления обратного и прямого потоков. Блок регулирования частоты вращения, размещенный в БУ, выполнен по наиболее простой, статической схеме и имеет приемлемые габариты и массу.

С целью снижения характерной для таких схем [2] «статической ошибки» по регулируемой величине, зависящей от нагрузки на СР, был увеличен коэффициент усиления (чувствительность) регулируемого электропривода до 10 об/(с·К). В результате максимальная «статическая ошибка» СР по регулируемой температуре при отсутствии колебаний не превышала 0,5 К. Для получения приемлемой динамики регулирования была увеличена и постоянная времени (инерционность).

Амплитуда, частота и продолжительность колебаний регистрировались в конце пускового периода и в стационарном режиме при возмущающем воздействии резким изменением тепловой нагрузки на систему. В ходе исследований испытан ряд конструкций МТО, отличающихся геометрическими параметрами каналов низ-

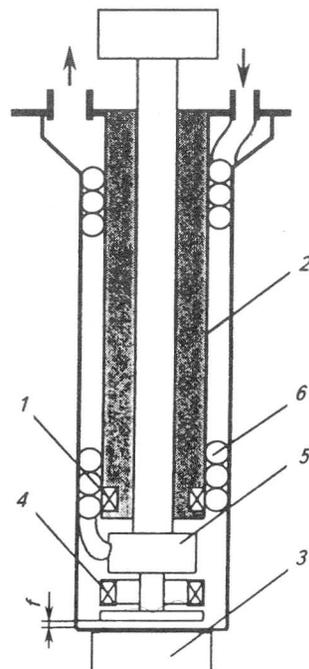


Рис. 2. Схема микротеплообменника

кого давления и расположением датчика температуры.

В качестве криоагента использовалась стандартная азотхладонозная газовая смесь.

Среди испытанных вариантов удовлетворительное качество переходных процессов получено на МТО с датчиком температуры 1 (рис.2), встроенным в сердечник 2. Эффект достигается в результате повышения инерционности датчика за счет его теплового контакта с массой сердечника и частичной тепловой изоляцией от потока криоагента. Однако при малых расходах, с уменьшением тепловой нагрузки качество регулирования ухудшалось. Кроме того, как при пуске системы, так и при работе в режиме разница температур между сердечником и криостатируемой зоной составляла около 5 К, что создавало проблемы при настройке системы.

Наиболее качественная динамика регулирования получена на МТО с предельно уменьшенным проходным сечением щелевого зазора f в испарителе (см. рис.2) и увеличенной скоростью омывания потоком охлаждаемого объекта 3. Расположенная по направлению движения перед датчиком температуры 4 и обладающая большой теплоемкостью масса объекта служит сглаживающим фильтром температурных колебаний в потоке криоагента, поступающего через дроссель-регулятор 5 из змеевика 6. Увеличение ско-

рости потока и соответственно коэффициента теплоотдачи повышает эффективность фильтрации. Кроме того, увеличение однородности потока вследствие распыления жидкой фазы при повышенной скорости в щелевом зазоре способствует устранению влияния разницы коэффициентов теплообмена датчика температуры с отдельными фазами и стабилизации его показаний. Основным недостатком данной конструкции – технологическая сложность стыковки МТО с объектом, связанная с обеспечением величины зазора f не более 0,1 мм. Варианты стыковки в настоящее время нами прорабатываются.

В результате использования настоящей разработки в несколько раз снижено потребление энергии в режиме криостатирования и также увеличен ресурс ЗДМКС. Удалось обеспечить высокое качество переходных процессов СР, что позволяет применять системы в объектах с быстроменяющимися внешними условиями. При этом масса и габариты системы существенно уменьшены.

Список литературы

1. Грезин А.К., Зиновьев В.С. Микробиогенная техника. – М.: Машиностроение, 1977.
2. Попов Е.П. Автоматическое регулирование и управление. – М.: Наука, 1966.
3. Хьюитт Дж., Холл-Тейлор Н. Кольцевые двухфазные течения. – М.: Энергия, 1974.