

Обеспечение температурного режима воздушных компрессорных станций

10, октябрь 2014

Новожилов Б. М., Козлов В. В.

УДК: 681.536.5

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

ЗАО "Энекон-Инжиниринг"

boris.m.novozhilov@yandex.ru

Современная компрессорная техника для производства сжатого воздуха в общепромышленном диапазоне давлений 0,6 – 1,0 МПа широко представлена винтовыми компрессорами. Среди них наиболее распространенными в диапазоне установленной электрической мощности до 250 кВт каждой единицы являются компрессоры с воздушным охлаждением. Работа воздушного компрессора сопровождается значительным тепловыделением, которое обусловлено повышением температуры сжимаемого воздуха в процессе его сжатия. Приблизительно 90 % потребляемой воздушными компрессорами электроэнергии выделяется в виде теплоты. Например, в компрессорной станции, состоящей из 3 - 5 компрессоров, тепловыделение может достигать 1 МВт. Концентрация столь значительного количества избыточного тепла в ограниченном объеме компрессорного зала требует создания совершенных систем обеспечения температурного режима компрессорного оборудования, способных в автоматическом режиме поддерживать работоспособность компрессорной станции при изменяющихся внешних и внутренних условиях.

Температурный режим производственного помещения, определяющий эффективность работы всей воздушно-компрессорной системы и ее надежность, должен быть следующим:

- минимальная температура воздуха +5 °С;
- максимальная температура воздуха для винтовых компрессоров +40 °С;
- оптимальная температура воздуха +20 ... +25 °С.

Для создания этих условий помещение компрессорной станции должно быть оборудовано системой обеспечения температурного режима (СОТР), которая должна эффективно отводить тепло в окружающую среду с помощью воздухопроводов и установленных на них воздушных клапанов и обеспечивать приток наружного воздуха на сжатие. При этом следует иметь в виду, что больше половины года в условиях климата России температура наружного воздуха ниже оптимальной температуры эксплуатации компрессорного оборудования. Поэтому в работе СОТР должна быть предусмотрена возможность использова-

ния (рекуперации) части выделяемой при сжатии воздуха тепловой энергии для целей подогрева приточного воздуха на сжатие, а также для отопления помещения станции и других помещений или подогрева технологической воды.

На рис. 1 приведена типовая схема компрессорной станции, состоящей из двух компрессоров с воздушным охлаждением. Нормальные условия их работы устанавливаются воздушной СОТР, основными элементами которой являются управляемые воздушные клапаны (заслонки), изменяющие воздушные потоки в компрессорном зале. При работе станции воздух на сжатие поступает в помещение через приточные клапаны и засасывается компрессорами, часть этого воздуха используется для охлаждения компрессоров. Горячий воздух отводится от компрессоров в окружающую среду с помощью воздуховода и клапана выброса. В холодное время года часть горячего воздуха возвращается через клапан рециркуляции в помещение, где смешивается с холодным наружным воздухом и подогревает его.

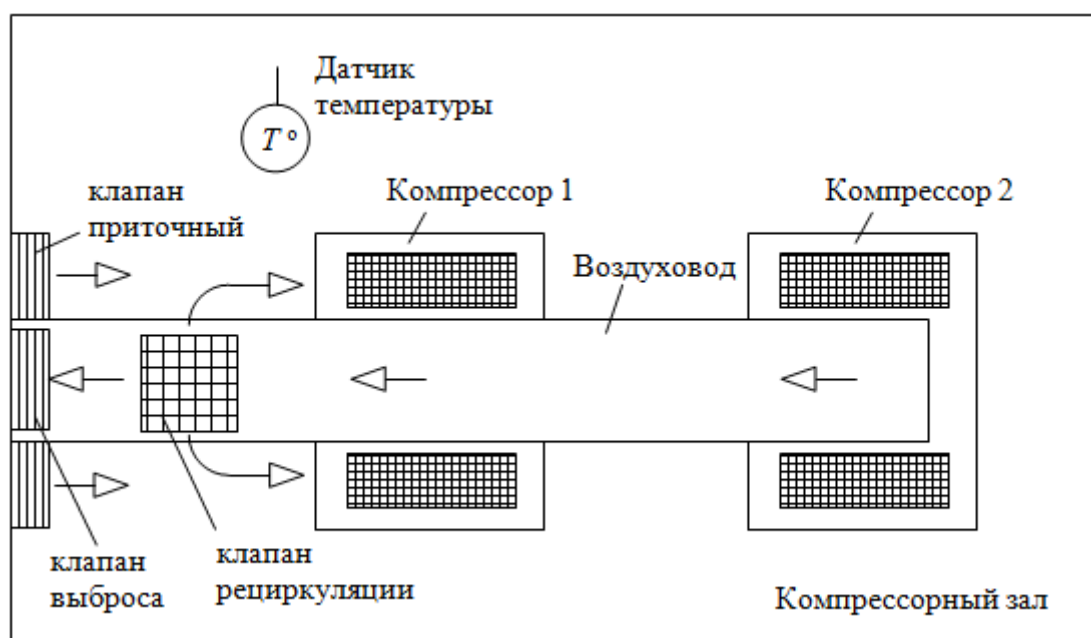


Рис. 1. Схема компрессорной станции

Степень открытия клапанов регулируется с помощью приводов в зависимости от температуры воздуха в помещении станции, измеряемой датчиками температуры. Т. е. основой воздушной СОТР компрессорной станции является система автоматического регулирования (САР) температуры воздуха в помещении станции.

Для того, чтобы управлять техническим динамическим объектом, необходимо иметь его математическую модель, точность которой определяет качественные показатели системы. При построении математической модели объекта управления определяют его структуру, статические и динамические характеристики. Далее устанавливают все взаимосвязи между переменными, характеризующими поведение объекта, и описывают их дифферен-

циальными уравнениями на основании физических законов. Решение уравнений в соответствии с целевой функцией дает необходимую информацию для разработки САР.

Компрессорные станции представляют собой пространственные объекты, температурное поле в которых характеризуется значительной неоднородностью, т. е. температура внутри помещения станции зависит не только от времени, но и от текущих координат точки измерения. Поэтому в общем случае температурное поле станции описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных. Решение такой системы уравнений в общей постановке представляет собой сложную задачу и целесообразно только при выполнении научно-исследовательских работ. На практике при контроле температурного режима компрессорной станции обычно используют точечный метод измерения температуры воздуха с одним или несколькими датчиками температуры, установленными непосредственно около компрессоров (см. рис. 1). Тогда в узком диапазоне регулирования температуры воздуха помещение компрессорной станции можно рассматривать как объект не с распределенными, а с сосредоточенными параметрами. В таком случае тепловое состояние компрессорной станции можно описать системой обыкновенных дифференциальных уравнений. При этом определение структуры локального контура управления тепловым режимом станции сводится к определению порядка соответствующего дифференциального уравнения. Это существенно упрощает построение математической модели объекта управления за счет применения преобразования Лапласа. Определенная таким образом передаточная функция является основой для построения САР.

В общем случае передаточную функцию промышленного объекта управления можно представить следующим образом:

$$K(p) = \frac{k \cdot e^{-\tau p}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)^n}, \quad (1)$$

где k – коэффициент передачи; τ – время транспортного запаздывания; T_1 и T_2 – постоянные времени; $n = 0, 1, 2, \dots$.

Передаточная функция (1) отражает наличие запаздывания в системе регулирования, которое проявляется в том, что в течение некоторого времени изменение управляющего воздействия практически не оказывает влияния на выходной сигнал. Применительно к компрессорной станции модель (1) содержит два вида запаздывания: транспортное и емкостное. Транспортное (чистое) запаздывание обусловлено конечным временем открытия (закрытия) воздушных клапанов и конечной скоростью распространения потока воздуха в помещении, емкостное – тепловой инерционностью объекта, которая обычно моделируется одним или несколькими последовательно включенными апериодическими звеньями. При этом инерционностью датчика температуры можно пренебречь по сравнению с инерционностью помещения.

Построение САР для объекта управления, имеющего передаточную функцию вида (1), связано с определением его динамических параметров. Решение этой задачи для промышленных объектов типа рассматриваемой компрессорной станции связано с большими

трудностями. Поэтому на практике модель (1) аппроксимируют аperiodическим звеном первого порядка с чистым запаздыванием с введением эквивалентных параметров:

$$K(p) = \frac{K_s \cdot e^{-\tau p}}{(T \cdot p + 1)}, \quad (2)$$

где K_s – коэффициент передачи; τ – время задержки; T – время выравнивания.

Модель (2) позволяет получить параметры регулирования, близкие к оптимальным, если снять переходную характеристику объекта или использовать значения, полученные для аналогичных объектов.

Считают, что отношение T/τ может служить мерой управляемости объекта:

- $T/\tau > 10$ – хорошо управляемый объект
- $T/\tau = 10$ – управляемый объект
- $T/\tau < 3$ – плохо управляемый объект

Возможны два подхода к построению САР: непрерывное (аналоговое) регулирование и позиционное (дискретное) регулирование.

Аналоговый принцип регулирования с применением универсальных алгоритмов позволяет получить высокую точность поддержания заданного значения регулируемой величины. Однако ему свойственны существенные недостатки, затрудняющие применение аналоговых регуляторов в промышленных объектах:

- невысокая эксплуатационная надежность из-за постоянной работы регулирующего органа;
- повышенная сложность настройки регулятора;
- невысокая стабильность настроек регулятора из-за старения элементов и температурного дрейфа параметров.

Применительно к СОТР компрессорных станций построение непрерывной САР температуры на основе воздушных клапанов осложняется из-за нелинейного характера их расходных характеристик, а также большого запаздывания, свойственного компрессорным станциям.

Позиционное регулирование нашло широкое распространение в системах регулирования температуры инерционных объектов благодаря простоте реализации, высокой надежности и стабильности работы. Его с успехом можно применять и в системах обеспечения теплового режима компрессорных станций, если учесть, что к качеству регулирования температуры воздуха в помещении станции по условиям технологии не предъявляется жестких требований.

В позиционных регуляторах сигнал, идущий на исполнительное устройство, не является непрерывным, как в аналоговых регуляторах, а имеет несколько фиксированных значений. Различают двухпозиционное, трехпозиционное и многопозиционное регулирование.

Двухпозиционные и трехпозиционные регуляторы работают по принципу «включено-выключено». Процесс регулирования в них имеет колебательный характер, и его пара-

метры зависят от величины зоны неоднозначности регулятора, величины запаздывания и подводимой энергии:

– период колебаний:

$$T_k = 2 \left[\tau + T \cdot \ln \frac{2x_{\text{пр}} - (x_{\text{пр}} - a) \cdot e^{-\frac{\tau}{T}}}{x_{\text{пр}} - a} \right], \quad (3)$$

– диапазон колебаний:

$$\Delta x = 2 \left[x_{\text{пр}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right) + a \cdot e^{-\frac{\tau}{T}} \right]. \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4) величина a определяет зону неоднозначности регулятора, а величина $x_{\text{пр}}$ является произведением коэффициента передачи объекта K_s и выходного сигнала регулятора.

Из выражений (3) и (4) следует, что запаздывание в системе регулирования увеличивает период и диапазон колебаний регулируемой величины. Чтобы уменьшить диапазон колебаний и тем самым увеличить точность регулирования в системе с запаздыванием, необходимо снизить зону неоднозначности двухпозиционного регулятора до нуля и уменьшить время задержки. В частности, достаточно высокую точность регулирования можно получить регулятором без зоны неоднозначности и условии $T/\tau > 10$. В ряде случаев в СОТР компрессорных станций последнее условие можно выполнить интенсификацией перемешивания воздуха в помещении с помощью дополнительного вентилятора. Вместе с тем, для приводов воздушных клапанов характерно значительное время поворота (несколько десятков секунд и более), что является одной из причин запаздывания в контуре регулирования температуры. Поэтому применение двухпозиционных регуляторов в паре с такими приводами может сопровождаться недопустимыми по требованиям технологии колебаниями температуры в установившемся процессе регулирования. В этом случае применяют различные методы улучшения качества двухпозиционного регулирования или переходом к многопозиционному регулированию.

Амплитуду колебаний при двухпозиционном регулировании можно уменьшить уменьшением выходного сигнала регулятора, обеспечив его максимальное значение только в переходном процессе. Суть этого метода показана на рис. 2 на примере объекта с самовыравниванием при двухпозиционном регуляторе с симметричной статической характеристикой без зоны неоднозначности при наличии запаздывания в системе.

Здесь предельное значение уровня регулируемой величины $+x_{\text{пр}}$ (включено) определяется величиной энергии, подаваемой на объект, выбирают из необходимости обеспечения достаточного быстродействия системы при ее выводе на заданный режим при включении (кривая 1). При прекращении подачи энергии регулируемая величина быстро уменьшается до минимального установившегося значения $-x_{\text{пр}}$ (кривая 2). В установившемся процессе регулирования размах колебаний регулируемой величины x определяется значением Δx .

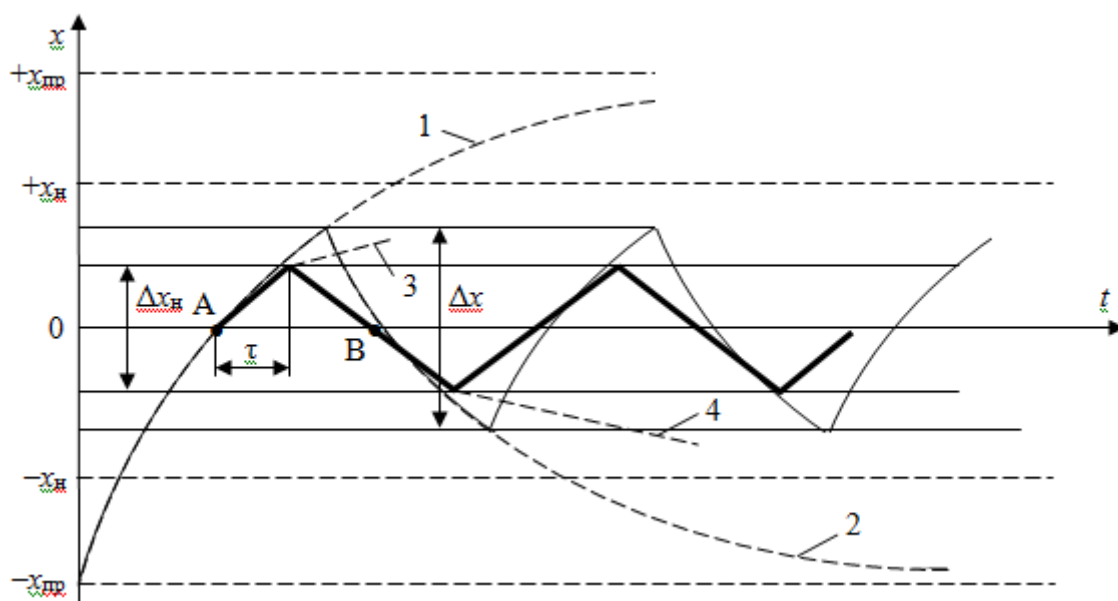


Рис. 2. Переходные процессы двухпозиционного регулирования при снижении уровня управляющего сигнала.

Для уменьшения положительной амплитуды колебаний после выхода объекта на режим (точка А) предельное значение регулируемой величины уменьшают до значения $+x_n$ снижением энергии, подаваемой на объект (кривая 3). Через время задержки τ регулируемая величина начинает уменьшаться до уровня отрицательной амплитуды. Ее величина должна быть достаточной, чтобы компенсировать максимальные возмущающие воздействия на объект. Уменьшение отрицательной амплитуды колебаний достигается неполным отключением подачи энергии (точка В), в результате чего предельное значение регулируемой величины повышается до $-x_n$ (кривая 4). Поэтому размах колебаний уменьшается до нового, меньшего значения Δx_n (на рис. 2 этот процесс условно показан прямыми линиями).

В СОТР воздушных компрессорных станций описанный метод может быть применен при условии использования в воздушных клапанах приводов с трехточечным управлением (сервоприводов), которые обеспечивают фиксацию клапанов в любом промежуточном положении в пределах угла поворота. Примером такого привода может служить электромеханический привод Belimo SM230A, имеющий 3-точечное управление и время полного поворота на 95° , равное 150 с. При выходе системы на стационарный режим задают это значение временного интервала, обеспечивающее полное открытие (или закрытие) клапана. При полностью открытом клапане температура в помещении быстро изменяется и по достижении задания уставки привод клапана включают на закрытие (или открытие), но время работы двигателя устанавливают меньшим, чем время полного поворота. Клапан, не достигнув крайнего положения, останавливается, и скорость изменения температуры снижается. Из-за наличия запаздывания в системе изменение температуры сменит знак на противоположный только через время задержки τ , сформировав тем самым

амплитудное значение температуры. По достижении заданной температуры привод вновь переключают на обратное движение с заданием времени работы двигателя, меньшим необходимого для достижения крайнего положения, и процесс повторяется.

Заданием временного интервала включения сервопривода на открывание и закрывание воздушных клапанов можно получить необходимое качество регулирования температуры воздуха в помещении компрессорной станции. При этом также облегчается режим работы клапанов, работающих в ограниченном интервале углов поворота. Для повышения устойчивости системы регулирования можно установить зону неоднозначности, однако при этом увеличится амплитуда колебаний температуры.

На рис. 3 показана схема регулирования с трехточечным управлением сервоприводом. Здесь применяется регулятор, выдающий управляющие сигналы (устанавливаемое значение) V по двум каналам: при отклонении регулируемой величины PV от задания SP в большую сторону ($>$) и в меньшую сторону ($<$). В такой системе реализуется трехпозиционное регулирование: привод M включен для поворота в одном из двух направлений и привод выключен. Т. е. в этом случае регулирование предполагает наличие зоны нечувствительности (мертвой зоны), когда привод выключен.

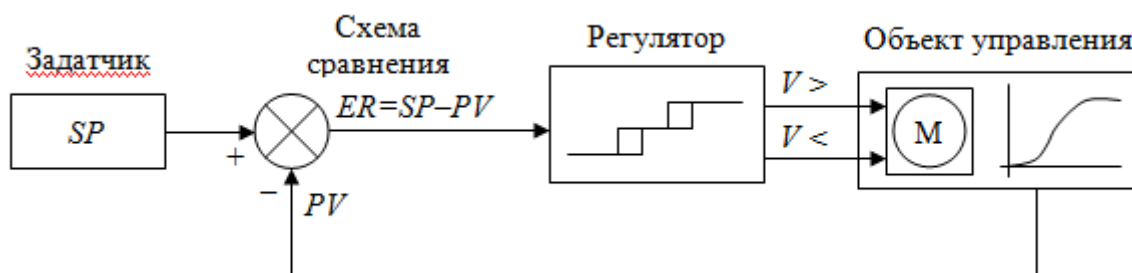


Рис. 3. Структурная схема системы с трехпозиционным регулированием: PV (Process value) – текущее значение регулируемой величины; SP (Set Point) – заданное значение регулируемой величины; ER (Error) – сигнал ошибки; V (Value) – устанавливаемое значение.

Следует отметить, что задание времени работы привода в виде постоянного значения не позволяет системе управления адаптироваться при изменении условий окружающей среды, что требует наличия запаса мощности управления. В компрессорной станции это приводит к установке воздушных клапанов большей площади. Более совершенной является схема регулирования с многопозиционным управлением исполнительными устройствами. На рис. 4 показан принцип работы системы регулирования температуры в помещении компрессорной станции с многопозиционным управлением приводами воздушных клапанов.

Процесс регулирования температуры происходит между двумя заданными предельными значениями температуры $T_{пр}^+$ и $T_{пр}^-$ с применением управления воздушными клапанами периодическими включениями и выключениями привода. При включении привода при одном из крайних значений температуры клапан поворачивается на некоторый задан-

ный угол и останавливается. В течение последующей паузы происходит изменение состояния процесса (на рис. 4 показано толстой линией), и достигнутое значение температуры воздуха сравнивается с заданием. Если эти значения не совпадают, привод снова включается и клапан снова поворачивается в прежнем направлении. Так происходит до тех пор, пока текущее значение температуры не сравняется с заданием. После этого процесс продолжается при фиксированном положении клапана, пока не будет достигнуто другое крайнее значение температуры. Привод снова будет периодически включаться, но уже поворачивая клапан в противоположном направлении. И далее процесс повторяется.

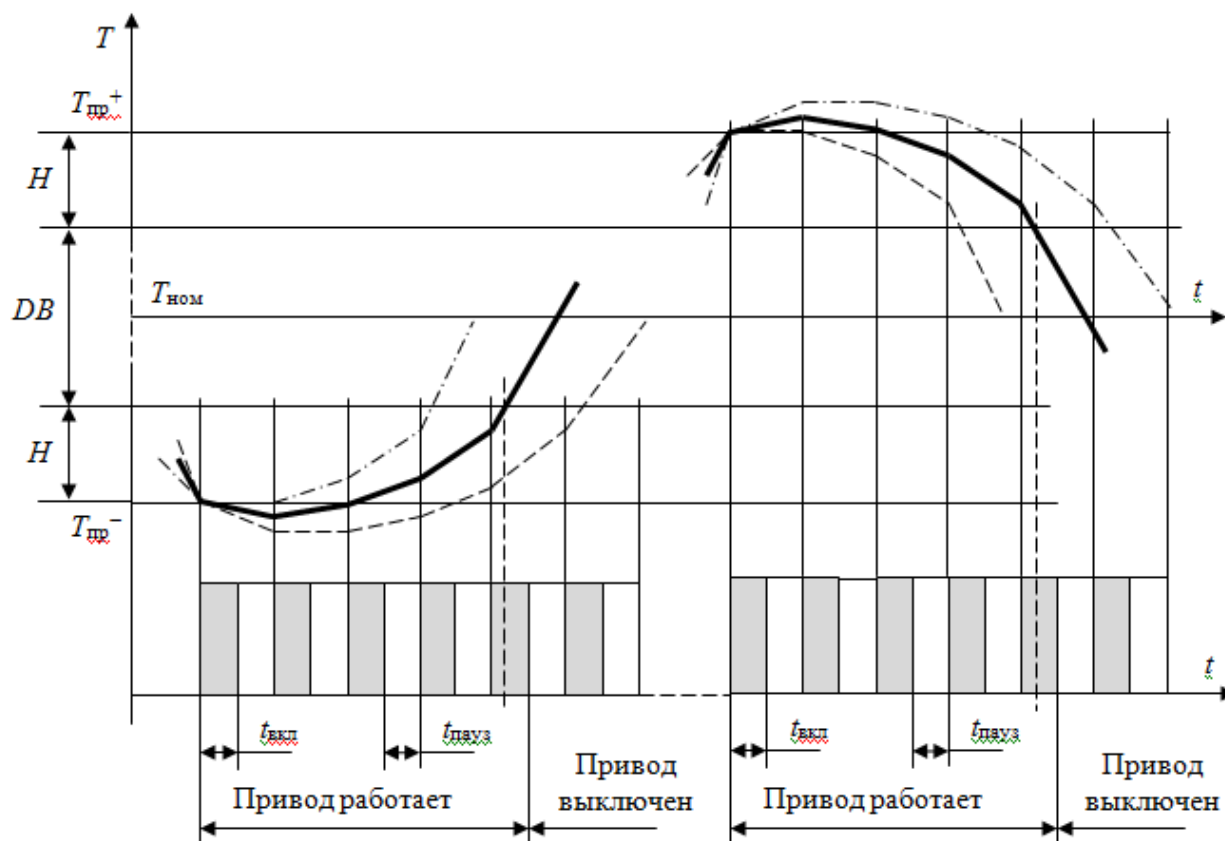


Рис. 4. Многопозиционное регулирование температуры: H (Hysteresis) – гистерезис, зона неоднозначности; DB (deadband) – зона нечувствительности.

Из рис. 4 следует, что система обладает свойством адаптации к изменению условий работы станции: при изменении тепловыделения в помещении станции или температуры окружающей среды количество интервалов включения привода клапана изменяется, уменьшая или увеличивая скорость изменения температуры (на рис. 4 показано пунктирной и штрихпунктирной линиями).

Выбором ширины гистерезиса H и зоны нечувствительности DB можно задать диапазон изменения температуры, а выбором времени включения $t_{\text{вкл}}$ и времени паузы $t_{\text{пауз}}$ уменьшить диапазон колебаний температуры при любом запаздывании в системе.

Для реализации рассмотренного принципа регулирования в состав регулятора должен быть введен генератор и счетчик интервалов включения привода, а также логический блок, определяющий канал выдачи управляющего воздействия. Указанные узлы удобнее реализовать программно, так как это позволяет легко изменять параметры регулирования в процессе настройки системы и ее эксплуатации. Для этой цели наиболее подходят программируемые логические контроллеры, позволяющие одновременно с регулированием технологических величин решать задачи логического управления оборудованием.

Рассмотренный метод обеспечения температурного режима компрессорного оборудования используется компанией «ЭНЕКОН» при проектировании воздушных компрессорных станций. В качестве средств управления в проектах применяются программируемые логические контроллеры SIMATIC S7 и логические модули LOGO! компании Siemens. Многолетняя эксплуатация реализованных проектов на таких известных предприятиях, как ВСМПО-АВИСМА (Верхняя Салда), Челябинский Электрометаллургический завод, Казанское моторостроительное предприятие, Липецкий кузнечный завод, Воскресенский завод ЖБК и многих других, подтверждает надежность СОТР компрессорных станций, разрабатываемых компанией «ЭНЕКОН».

Особо следует отметить использование рассмотренного метода регулирования температуры в воздушных СОТР модульных компрессорных станциях, где он показал высокую эффективность работы в условиях ограниченного пространства компрессорного помещения. Модульные станции проектов «ЭНЕКОН» успешно эксплуатируются на предприятиях компаний ТЭК (Газпром, Роснефть, Лукойл, Сибур и других). Алгоритмы управления и применяемые технические средства позволяют обеспечить требуемый температурный режим автономных модульных компрессорных станций при их эксплуатации в условиях крайнего севера, при температурах наружного воздуха до -55°C .

Список литературы

1. Беспалов А.В., Харитонов Н.И. Системы управления химико-технологическими процессами: учебник для вузов / А.В. Беспалов, Н.И. Харитонов. – М.: ИКЦ «Академкнига». 2007. 690 с.
2. Ключев А.С. Двухпозиционные автоматические регуляторы и их настройка / А.С. Ключев. М.: Энергия. 1967. 104 с.
3. Многопозиционные регуляторы. – URL: <http://automation-system.ru/main/item/406-mnogopoziczionnye-regulyatory.html>
4. Правила установки компрессора и подготовки его к эксплуатации. – URL: <http://www.fwater.ru/?n=news&id=30>.
5. Тепло компрессорных установок / Н.Д. Денисов-Винский // МегаПаскаль. 2011. №2. С. 8 – 16.
6. Техника автоматического регулирования для практиков / Манфред Шляйхер, пер. с нем. – JUMO GmbH: номер компонента 00495055, номер книги FAS525. 2006. 121 с.

7. Трехпозиционные регуляторы. – URL: <http://automation-system.ru/main/item/405-3-position-regylator.html>.
8. BELIMO / Каталог продукции. – URL: <http://www.belimo.ru/clap1.shtml>.