

Экспериментальная установка для исследования работы систем регулирования малых холодильных машин

© С.С. Шереметьев, А.О. Ширшиков, Н.А. Лавров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Инвариантная система регулирования хорошо справляется с любыми видами внешнего воздействия и удовлетворяет самым жестким требованиям к регулированию установок. В статье рассмотрены метод экспериментального исследования систем регулирования в малых холодильных установках и оборудование для его проведения. Цель работы заключается в получении передаточных функций элементов системы, а также передаточной функции инвариантного регулятора и его реализация в расширительном элементе экспериментальной установки — электронном расширительном вентиле. Приведено описание схемы спроектированной экспериментальной установки, методов и средств, применяемых при изучении переходных процессов. В результате исследования планируется выработать методику проектирования и настройки точных систем автоматического регулирования.

Ключевые слова: *переходные процессы, регулирование температуры, инвариантный регулятор, системы автоматического регулирования.*

Работа любой холодильной установки, особенно закрытых систем, зависит от температуры окружающей среды и тепловой нагрузки на систему [1]. С учетом внешних факторов инженер проектирует установку, задавая параметры оптимального режима работы при минимальных затратах энергии. Однако внешние факторы, к которым относят тепловую нагрузку и параметры окружающей среды, могут быть изменены, что приведет к ухудшению характеристик холодильной машины [10]. При проектировании установки с определенным режимом специалист обязан проверить, как состояние окружающей среды будет влиять на рабочие параметры установки.

Установку считают работоспособной в том случае, если она выполняет свое назначение. Например, основное требование, предъявляемое к рефрижераторным установкам, — обеспечение постоянной температуры. При этом необходимо учитывать, что в зависимости от состояний объекта и окружающей среды должна быть и различная холодопроизводительность. При проектировании жилых установок важно решить проблему поддержания режима максимального получения жидкого продукта. Для газоразделительных установок главным условием является соответствие рабочих параметров технологическому режиму.

Вопросы регулирования и безаварийной работы установки решают с помощью применения систем автоматического регулирования (САР), причем чем жестче эксплуатационные требования, тем точнее должны работать регуляторы [3]. С использованием автоматического регулирования системе удастся перестраивать таким образом, чтобы определенные внутренние параметры были постоянными или изменялись по требуемому закону [2, 4–7].

Обычно системы автоматического регулирования собирают из типовых регулирующих звеньев. В теории автоматического регулирования руководствуются двумя принципами регулирования: по возмущению и по отклонению. Уникальной является инвариантная система регулирования, основанная на комбинации этих двух принципов [8]. При отладке системы по принципу возмущения регулятор получает информацию об изменении внешнего воздействия и влияет на систему, изменяя ее характеристики. Данный принцип не всегда эффективен, поскольку САР не реагирует на трансформацию регулируемого параметра, что приводит к отсутствию эффекта регулирования. При реализации системы регулирования по принципу отклонения регулятор получает сигнал об изменении регулируемого параметра и воздействует на систему, приводя значение этого параметра к исходной величине, поэтому этот принцип широко применяют в технике.

В основном в регуляторах используют три закона регулирования: пропорциональный, интегральный и дифференциальный. С помощью пропорционального закона САР выводит установку на определенный режим, но при этом возникает статическая ошибка. Применение интегрального закона позволяет избавиться от такой ошибки. При дифференциальном законе регулирования удастся убирать резкие пики на начальном этапе воздействия регулятора на систему. Сочетание трех законов регулирования, т. е. применение пропорционального интегрального дифференциального (ПИД) регулятора, показывает наилучшие результаты. ПИД-регуляторы характеризуются минимальной статической ошибкой и хорошей динамической характеристикой. Существуют также нелинейные элементы регулирования, например реле и т. п., однако их использование может привести к возникновению автоколебаний, поэтому такие элементы не применяют в технических системах с повышенными требованиями к надежности работы.

В современных холодильных установках средствами регулирования могут выступать как реле, так и ПИД-регуляторы [4]. С их помощью можно достичь точного регулирования температуры в диапазоне $0,1...0,25$ К, что доказывает их высокую эффективность. Следует отметить, что изменения температуры в переходных процессах могут выходить за пределы $0,25$ К и длиться продолжительное время, что неприемлемо для особо точных режимов работы установки.

Существует еще одна система регулирования, называемая инвариантной. Ее действие основано на одновременной работе по принципам возмущения и отклонения. Передаточную функцию регулятора подбирают таким образом, чтобы любое воздействие внешнего фактора нивелировалось. Поэтому в идеальной инвариантной САР отсутствуют и статическая ошибка, и переходный процесс [7]. Применение данной системы регулирования позволяет повысить надежность и точность работы холодильных систем и уменьшить металлоемкость установок.

Благодаря применению идеальной инвариантной САР возможно создание высокоточной низкотемпературной системы термостатирования, обеспечение устойчивости режимов работы газоразделительных установок (ГРУ) для получения особо чистых газов и т. п. Отметим, что до настоящего времени такие САР в холодильных установках не использовались ввиду сложности их настройки. Однако при современном состоянии вычислительной техники такие задачи становятся решаемыми, открытым остается вопрос моделирования инвариантной САР.

Важной задачей проектирования инвариантной САР является математическое моделирование установки, проверка моделей на эксперименте и программирование регулятора по полученной модели инвариантного регулятора.

Для моделирования инвариантной САР на базе малой холодильной машины с воздушным испарителем и воздушным конденсатором был создан экспериментальный стенд (рис. 1).

Установка управляется хладагентом R134a (тетрафторэтан). Данный тип хладагента широко используется в холодильной технике, так как является озонобезопасным.

Рассмотрим работу экспериментальной спроектированной холодильной установки. Компрессор 1 сжимает пары фреона до давления конденсации, температура за компрессором измеряется термодатчиком, что позволяет вычислять работу компрессора. После компрессора сжатый фреон поступает в воздушный конденсатор 2, далее жидкость фреона накапливается в ресивере 3. Затем жидкость фреона поступает в регенератор 4, где переохлаждается обратным потоком. После регенератора жидкость проходит антикислотный фильтр-осушитель 5: здесь фреоно-масляная смесь очищается от кислоты и воды, которые могли остаться в системе в результате недостаточной осушки установки перед заправкой. Давление конденсации можно регулировать с помощью регулятора 7, а наличие жидкости контролировать через смотровое стекло 6. После фильтра жидкость поступает в одно из расширительных устройств: электронно-расширительный вентиль (ЭРВ) 8, мембранный запорный вентиль 9 или

в терморегулирующий вентиль (ТРВ). Расширительные устройства отключаются от системы с помощью запорных вентилей. После расширительного устройства парожидкостная смесь хладагента поступает в воздушный испаритель 11, где, испаряясь, охлаждает поток поступающего воздуха. Холодный пар фреона направляется в регенератор 4, где охлаждает прямой поток, и поступает на всасывание компрессора 1. Давление испарения регулируется регулятором 13, а смотровое стекло 12 позволяет контролировать отсутствие жидкости на всасывании в компрессор.

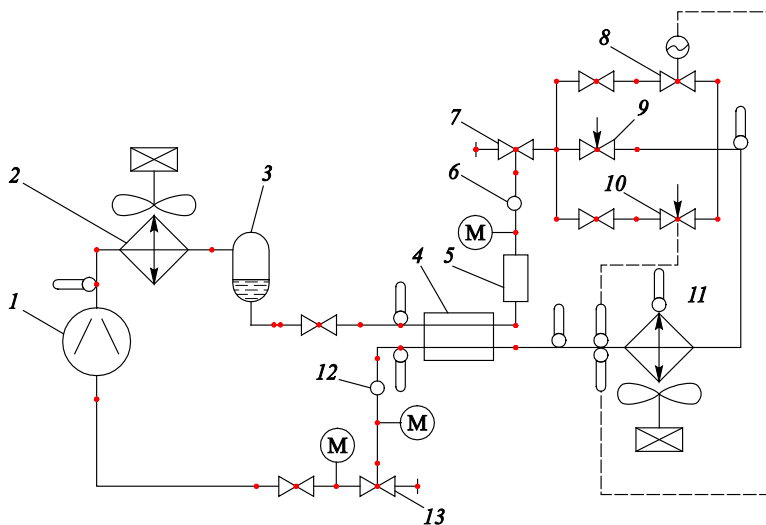


Рис. 1. Технологическая схема экспериментального стенда:

1 — герметичный поршневой компрессор; 2 — воздушный конденсатор; 3 — ресивер; 4 — регенератор; 5 — антикислотный фильтр-осушитель; 6 — смотровое стекло за конденсатором; 7 — регулятор давления конденсации; 8 — электронно-расширительный вентиль; 9 — мембранный запорный вентиль; 10 — терморегулирующий вентиль; 11 — воздушный испаритель; 12 — смотровое стекло за испарителем; 13 — регулятор давления испарения; М — манометр. Условные обозначения: ⏏ — термочувствительный элемент (термодатчик); ⌘ — запорный вентиль

Регулируемым параметром выступает температура воздуха после воздушного испарителя. С помощью термодатчиков отслеживают следующие температуры: на нагнетании компрессора для контроля мощности компрессора, за ресивером для контроля мощности конденсатора, перед и после регенератора для контроля мощности регенерации и холодопроизводительности. Давление конденсации, кипения и всасывания контролируются датчиками давления.

Установка работает по парокомпрессионному циклу с регенератором. Расчетная схема для моделирования установки представлена на рис. 2.

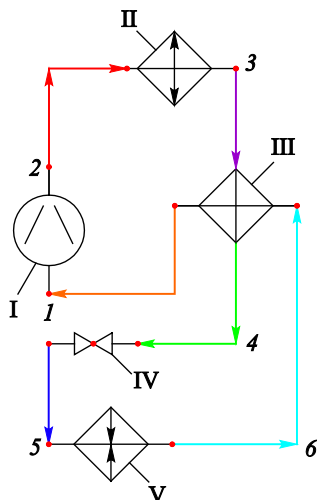


Рис. 2. Расчетная схема установки:

I — компрессор; II — конденсатор; III — регенератор; IV — расширительное устройство; V — испаритель

Цикл установки представлен на диаграмме Молье (рис. 3), на которой изображены процессы: 1–2 политропное сжатие в компрессоре, 2–3 охлаждение и конденсация в конденсаторе, 3–4 переохлаждение жидкости в регенераторе, 4–5 изохалтное расширение в расширительном устройстве, 5–6 испарение жидкости в испарителе, 6–1 перегрев в регенераторе.

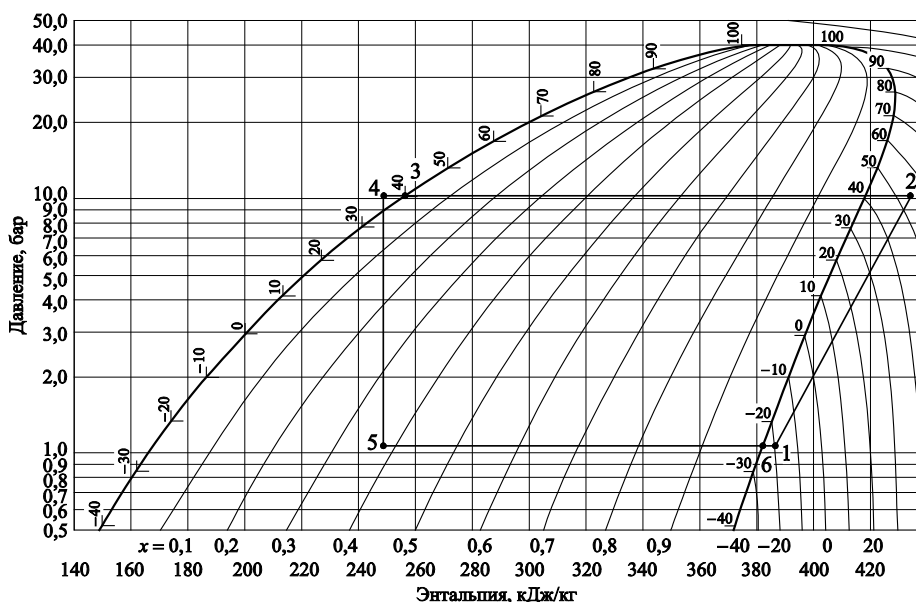


Рис. 3. Цикл установки на диаграмме Молье

Ниже приведен ожидаемый режим работы установки:

Температура, °С:
 конденсации 40
 испарения -25

Максимальная холодопроизводительность установки, кВт .. 3

Созданный экспериментальный стенд предназначен для моделирования передаточных отношений элементов холодильной техники при изменении тепловой нагрузки и анализа влияния работы различных расширительных устройств на переходные процессы в холодильной установке. Схема регулирования установки представлена на рис. 4.

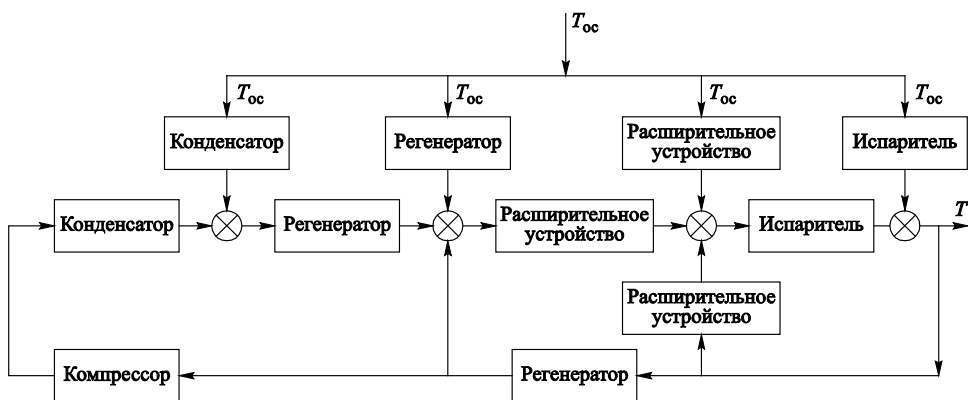


Рис. 4. Схема регулирования установки

Экспериментальный стенд позволяет проверить математические модели работы малых холодильных установок. В результате экспериментов планируется получение передаточной функции инвариантного регулятора, программирование контроллера ЭРВ по полученной модели, реализация на практике инвариантной САР.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Горев С.М. *Автоматика холодильных установок и аппаратура контроля*. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2008, 116 с.
- [2] Столетов В.М. *Регулирование и автоматизация холодильных и криогенных установок и систем кондиционирования воздуха и их безопасность*. Кемеровский техн. ин-т пищевой промышленности, Кемерово, 2008, 108 с.
- [3] Шибанов Г.П., Мельников В.П. *Безопасность жизнедеятельности в авиакосмической отрасли*. Москва, Академия, 2011, 231 с.
- [4] Схиртладзе А.Г., Воронов В.Н., Борискин В.П. *Автоматизация производственных процессов в машиностроении*. Старый Оскол, ТНТ, 2013, 599 с.
- [5] Горев С.М. *Автоматизация производственных процессов нефтяной и газовой промышленности*. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2003, 121 с. URL:

http://www.studmed.ru/gorev-sm-avtomatizaciya-proizvodstvennyh-processov-neftyanoj-i-gazovoj-promyshlennosti_91301478526.html

- [6] Дячек П.И. *Холодильные машины и установки*. Дячек П.И., ред. Ростов-на-Дону, Феникс, 2007, 421 с.
- [7] Петраков Ю.В., Драчев О.И. *Теория автоматического управления технологическими системами*. Москва, Машиностроение, 2008, 336 с.
- [8] Мартемьянов Ю.Ф., Лазарева Т.Я., Харченко В.Ю. *Теория автоматического управления*. Тамбов, Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009, 64 с.
- [9] Пигарев В.Е., Архипов П.Е. Пигарев В.Е. ред. *Холодильные машины и установки кондиционирования воздуха*. Москва, Маршрут, 2003, 424 с.
- [10] Архаров А.М., Буткевич И.К. ред. *Машины низкотемпературной техники. Криогенные машины и инструменты*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, 584 с.

Статья поступила в редакцию 28.12.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Шереметьев С.С., Лавров Н.А., Ширшиков А.О. Экспериментальная установка для исследования работы систем регулирования малых холодильных машин. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 11.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-11-1548>

Шереметьев Станислав Сергеевич – ассистент и магистрант кафедры «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Инженер науч.-учеб. комплекса «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: trmlvnos@gmail.com

Ширшиков Алексей Олегович – студент первого курса кафедры «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Лаборант науч.-учеб. комплекса «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: c-_c@mail.ru

Лавров Николай Алексеевич – д-р тех. наук, проф. кафедры «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: 79035596471@yandex.ru

The Experimental Setup for the Operation of Small Refrigerator Control System Research

© S.S. Sheremetyev, A.O. Shirshikov, N.A. Lavrov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article discusses a method and equipment for the small refrigerator control system experimental research. The research was performed with the purpose of developing precise automatic control systems. The work objective is to obtain transfer functions of the system components, to obtain the transfer function of the invariant controller and the controller implementation in the expansion component of the experimental setup: in the electronic expansion valve. The invariant control system perfectly copes with any kind of external influence and meets the most stringent requirements for a plant control. This article describes the designed experimental setup scheme, the methods and means of transition process research. It is supposed that the research results will allow to obtain techniques for designing and adjusting precise automatic control systems.

Keywords: transition process, temperature control, invariant controller, automatic control system.

REFERENCES

- [1] Gorev S.M. *Avtomatika kholodilnykh ustanovok i apparatura kontrolya* [Automatic Refrigeration Equipment and Monitoring Facility]. Petropavlovsk-Kamchatskiy, KamchatGTU, 2008, 116 p.
- [2] Stoletov V.M. *Regulirovanie i avtomatizatsiya kholodilnykh i kriogenykh ustanovok i sistem konditsionirovaniya vozdukhа i ikh bezopasnost* [Refrigeration, Cryogenic and Air Conditioning System Control and Automation and Safety of the Systems]. Kemerovo, Kemerovo Technological Institute of Food Industry, 2008, 108 p.
- [3] Shibanov G.P., Melnikov V.P. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti v aviakosmicheskoy otrasli* [Health and Safety in the Aerospace Industry]. Moscow, Academiya Publ., 2011, 231 p.
- [4] Skhirtladze A.G., Voronov V.N., Boriskin V.P. *Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov v mashinostroenii* [Automation of Production Processes in Mechanical Engineering]. Staryy Oskol, Tonkie Naukoemkie Tekhnologii Publ., 2013, 599 p.
- [5] Gorev S.M. *Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov neftyanoy i gazovoy promyshlennosti. Ch.1* [Automation of Manufacturing Processes in the Oil and Gas Industry. Part 1]. Petropavlovsk-Kamchatskiy, KamchatGTU Publ., 2003, 121 p. Available at: http://www.studmed.ru/gorev-sm-avtomatizatsiya-proizvodstvennykh-processov-nefyanoy-i-gazovoy-promyshlennosti_91301478526.html
- [6] Dyachek P.I. *Kholodilnye mashiny i ustanovki* [Refrigeration Machines and Systems]. Rostov-on-Don, Phoenix Publ., 2007, 421 p.
- [7] Petrakov Yu.V., Drachev O.I. *Teoriya avtomaticheskogo uprevleniya tekhnologicheskimi sistemami* [The Theory of Technological System Automatic Control]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008, 336 p.
- [8] Martemyanov Y.F., Lazareva, T.Ya., Kharchenko V.Yu. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Laboratornye raboty* [Automatic Control Theory. Laboratory works]. Tambov, Tambov State Technical University Publ., 2009, 64 p.

- [9] Pigarev V.E., Arkhipov P.E. *Kholodilnye mashiny i ustanovki konditsionirovaniya vozdukhа* [Refrigerators and Air Conditioning Units]. Moscow, Marshrut Publ., 2003, 424 p.
- [10] Arkharov A.M., Butkevich I.K., ed. *Mashiny nizkotemperaturnoy tekhniki. Kriogennye mashiny i instrumenty* [Machinery of Low-Temperature Technology. Cryogenic Machinery and Tools]. Moscow, BMSTU Publ., 2015, 584 p.

Sheremetyev S.S., Assistant Lecturer, M.Sc. student, Department of Refrigerating, Cryogenic Technology. Conditioning and Life Support Systems, Engineer, the Center of Research and Education “Power Engineering”, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: trmlvnos@gmail.com

Shirshikov A.O., first year student, Department of Refrigerating, Cryogenic Technology. Conditioning and Life Support Systems, laboratory assistant, the Center of Research and Education “Power Engineering”, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: c-_c@mail.ru

Lavrov N.A., D.Sc. (Eng.), Professor of the Department of Refrigerating, Cryogenic Technology. Conditioning and Life Support Systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: 79035596471@yandex.ru