Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию

Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики

В.И.Егоров, В.А.Кораблев, А.В.Шарков

Системы термостатирования

Методические указания к лабораторным работам

Санкт-Петербург
2006

В.И.Егоров, В.А.Кораблев, А.В.Шарков Системы термостатирования. Методические указания к лабораторным работам. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. - 51 с.

Методические указания к лабораторным работам составлены соответствии с программой курса "Системы термостабилизации и термостатирования" Государственного стандарта высшего и профессионального образования для направления подготовки дипломированных специалистов 140402 – Теплофизика и направления подготовки бакалавров и магистров 140400 – Техническая физика.

В настоящее издание вошли лабораторные работы, посвященные градуировке полупродводникового термометра сопротивления, исследованию релейного электронного регулятора температуры, исследованию термостата с газонаполненной тепловой трубой

Подготовлено на кафедре компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга.

Одобрено к изданию на заседании кафедры КТФ и ЭМ 20 октября 2005 года. Одобрено на заседании методической комиссии инженерно-физического факультета 17 января 2006 года.

Рецензенты:

Зав. кафедрой «Теоретические основы теплотехники» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, проф., д.т.н. Сапожников С.З.

Зав. кафедрой квантовой электроники и биомедицинской оптики Санкт-петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, д.т.н., проф. Храмов В.Ю.

Допущено Учебно-методическим объединением по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки 140402 – Теплофизика и 140400 – Техническая физика.

© Авторы: В.И.Егоров, В.А.Кораблев,
А.В.Шарков 2006.
© Санкт-Петербургский государственный
университет информационных технологий,
механики и оптики, 2006.

Оглавление

Введение ……. **4**

Лабораторная работа № 1. Градуировка полупроводникового термометра сопротивления …….. **5**

Лабораторная работа № 2. Исследование подогревного термостата с двухпозиционным регулятором …… **9**

Лабораторная работа № 3. Исследование релейного электронного регулятора температуры ……. **23**

Лабораторная работа № 4. Исследование переходных характеристик объекта регулирования и чувствительного элемента ……. **32**

Лабораторная работа № 5. Исследование термостата с газонаполненной тепловой трубой ……... **41**

Введение

Одной из главных задач учебного курса «Системы термостатирования и термостабилизации» является практическое освоение методов анализа различных устройств с автоматическим регулированием тепловых процессов.

В ходе выполнения лабораторных работ исследуются динамические характеристики датчиков температуры, применяемых в системах регулирования тепловых процессов, объектов регулирования и регуляторов температуры. Особое внимание уделено методам обеспечения точности регулирования температуры и причинам появления статической и динамической погрешностей.

Для анализа линейных систем применяется метод передаточных функций с использованием преобразования Лапласа.

В системах с двухпозиционным регулированием температуры особое внимание уделено особенностям регуляторов и методам уменьшения погрешности термостатирования тепловых процессов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1
ГРАДУИРОВКА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ТЕРМОМЕТРА СОПРОТИВЛЕНИЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – ознакомиться с методикой градуировки полупроводниковых термометров сопротивления с использованием водяного термостата.

ПРОГРАММА РАБОТЫ:

1. Ознакомиться с принципом работы термостата.
2. Ознакомиться с методикой градуировки полупроводниковых термометров сопротивления.
3. Провести градуировку.
4. Используя полученные результаты, построить зависимость сопротивления от температуры, определить коэффициенты, используемые в аппроксимирующей зависимости.
5. В отчете привести схему измерения, результаты градуировки, расчеты.

Схема работы термостата

Термостатом называется устройство для поддержания температуры в определенном объеме. Существуют различные методы классификации термостатов, которые делят по следующим основным признакам: по длительности эксплуатации (активные, пассивные), типу тепловой защиты, типу регулирующего воздействия, типу регуляторов и другим признакам.

В лабораторной работе используется жидкостный термостат с двухпозиционным регулированием (см. рис.1)

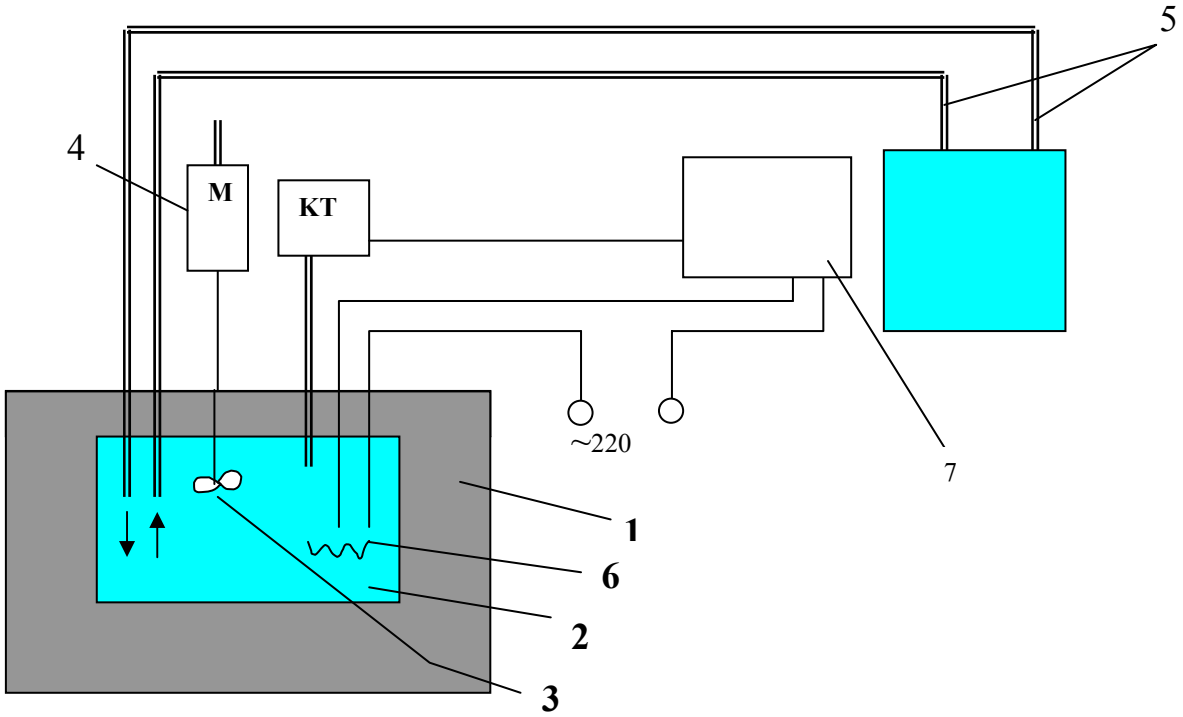


Рис.1. Схема жидкостного термостата.

Термостат представляет собой изолированный от внешней среды резервуар 1, наполненный термостатной жидкостью 2. В зависимости от условий работы и диапазона регулируемых температур в качестве термостатной жидкости используется дистиллированная вода (0..100°C), метиловый или этиловый спирт (-60..30°C), чистый или с примесью воды глицерин (+30..160°C), минеральные масла (+70..+300°C). Жидкость в термостате интенсивно перемешивается мешалкой 3, приводимой во вращение электромотором 4. Одновременно мотор заставляет работать двойной насос, конструктивно выполненный совместно с мешалкой (на схеме не показан).

В результате действия насоса жидкость может прокачиваться через любую систему, подключенную к входному и выходному патрубкам 3 термостата. Нагрев термостатной жидкости осуществляется с помощью электронагревателя 6. Температура жидкости в резервуаре контролируется ртутным термометром.

Регулирование и поддержание температуры на необходимом уровне производится автоматически. Чувствительным элементом схемы автоматической стабилизации температуры является ртутно-стеклянный электроконтактный термометр типа ТПК с магнитной настройкой верхнего контакта.

Контактный термометр включен в электрическую цепь автоматического регулятора. В термостате используется двухпозиционная схема автоматического регулирования, позволяющая поддерживать температуру с точностью до $\pm 0{,}5$ К.

Схема регулятора включает в себя: усилитель, реле, управляющее включением силовой цепи, и силовую цепь, состоящую из двух включенных встречно тиристоров и нагревателя. Если температура жидкости в термостате ниже заданного значения, то ток через контактный термометр не проходит. В этом случае с усилителя поступает постоянное напряжение на реле, которое открывает тиристорный ключ и, следовательно, через нагреватель идет ток. Температура жидкости в термостате будет повышаться. Если температура жидкости превысит заданное значение, то ток, протекающий через контактный термометр, будет создавать смещение усилителя, сигнал на реле не будет поступать, тиристорный ключ закроется, ток через нагреватель не пойдет и температура жидкости в термостате будет повышаться.

Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления (ТС)

Для измерения в среднем диапазоне температур широко применяются полупроводниковые ТС. Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления – относятся к наиболее простым

полупроводниковым приборам. Простота устройства в сочетании с резко выраженной нелинейной зависимостью величины сопротивления от температуры привела к широкому использованию ТС в автоматике, электронике, термометрии и других отраслях.

Рабочий диапазон полупроводниковых ТС определяется следующим образом: нижний предел должен соответствовать температуре, при которой полупроводник становится изолятором, а верхний предел – так называемой допустимой температуре, выше которой в полупроводнике происходят необратимые изменения.

Основными параметрами полупроводниковых ТС являются:

1) величина сопротивления $R_{ном}$ при температуре окружающей среды 20°С;

2) величина температурного коэффициента сопротивления (т. к. с.) $\alpha_{т}$ – в процентах на 1К;

3) постоянная величина τ,сек, характеризующая тепловую инерционность ТС;

4) максимально допустимая температура t_{max};

5) максимально допустимая мощность рассеивания P_{max}, и др.

Температурная зависимость сопротивления является главной характеристикой полупроводниковых ТС.

Для большинства типов ТС с отрицательным т. к. с. с достаточной для практики точностью температурная зависимость сопротивления аппроксимируется выражением

$$R=A\cdot e^{B/T}. \qquad (1)$$

Постоянная A зависит от физических свойств материала и габаритов ТС, постоянная B зависит от физических свойств материала.

Температурный коэффициент сопротивления определяется по формуле

$$\alpha_{т}= - B/T^{2} \qquad (2)$$

По формулам (2), (3), (1) определяют постоянные A, B и т. к. с. для данного типа полупроводникового ТС.

Существенным недостатком полупроводниковых материалов является отсутствие воспроизводимости градуировочной характеристики. Поэтому полупроводниковые ТС даже одного и того же типа не взаимозаменяемы и имеют индивидуальные градуировки.

В лабораторной работе проводится градуировка полупроводниковых ТС типа ММТ-4 и КМТ-4. ТС типа КМТ созданы на основе кобальто-марганцевых, а ММТ – медно-марганцевых оксидных полупроводников. Рабочий диапазон температур ММТ-4 и КМТ-4 от – 60 до 125°С.

ПОРЯДОК ПОДГОТОВКИ И ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Проверить электрическую схему измерения сопротивления ТС.
2. Включить цифровой омметр и измерить сопротивление ТС при комнатной температуре.
3. Включить мотор термостата и убедиться в прохождении жидкости через термостатируемый объект. Термостат включается тумблером ″сеть″.
4. Настроить контактный термометр на температуру +30°С.
5. Включить нагреватель термостата, поворотом ручки ″мощность нагревателя″ установить максимальную мощность.
6. Провести градуировку ТС через 10К, последовательно изменяя установку контактного термометра до температуры 60..80°С.
7. Провести градуировку ТС через 5..10К при свободном охлаждении термостатирующей жидкости.
8. По окончании работы выключить термостат.
9. По полученным результатам построить зависимость сопротивления полупроводниковых ТС от температуры, определить постоянные А и В, температурный коэффициент сопротивления α. Сравнить полученные значения с литературными данными [3].

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните работу термостата и электроконтактного термометра.
2. Объясните физическую сущность изменения сопротивления в зависимости от температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергия, 1978.
2. Шефтель И.Т. Терморезисторы. – М.: Наука, 1973.
3. Геращенко О.А., Гордов А.Н., Лах В.И., Стаднык Б.И., Ярышев Н.А. Температурные измерения. Справочник. – Киев: Наукова думка, 1984.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДОГРЕВНОГО ТЕРМОСТАТА С ДВУХПОЗИЦИОННЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ - выработка навыков расчета и экспериментального определения основных показателей качества работы термостатирующих устройств с регуляторами релейного типа.

ПРОГРАММА РАБОТЫ:

1. Экспериментальное определение зоны неоднозначности двухпозиционного регулятора.
2. Экпериментальное определение времени выхода на рабочий режим и динамической погрешности термостата для кварцевого резонатора.
3. Расчет характерных температур, времени выхода на рабочий режим и динамической погрешности.
4. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений перечисленных показателей.

Основные теоретические положения

Малогабаритные подогревные термостаты для пассивных (без тепловыделений) объектов представляют достаточно обширный класс термостатирующих устройств. К их числу могут быть отнесены термостаты для кварцевых резонаторов, ультразвуковых линий задержки.

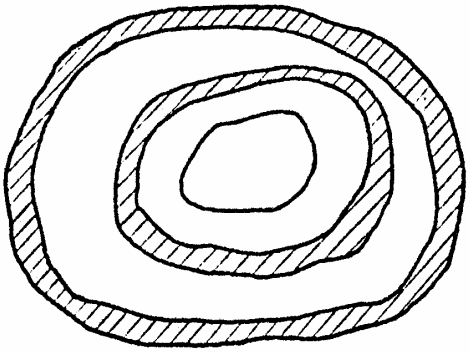


Рис. 1. Модель термостата в виде криволинейных оболочек.

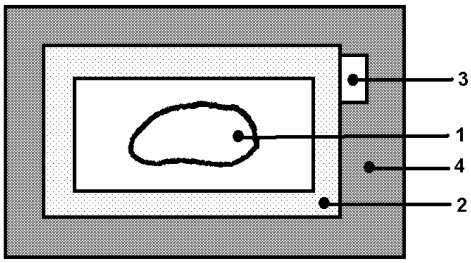


Рис. 2. Тепловая модель термостата
1 - объект термостатирования
2 - камера с источником энергии
3 - датчик системы регулирования
4 - тепловая изоляция

При тепловом анализе такие термостаты представляются моделью, являющейся системой нескольких замкнутых криволинейных оболочек (рис.1).

Опыт разработки различных термостатирующих устройств с тепловой моделью, аналогичной рис.1, показал, что в первом приближении исследование динамических режимов термостата может быть проведено на базе трехемкостной модели с сосредоточенными параметрами (рис.2).

Этот вывод лег в основу разработки инженерной методики расчета следующих основных показателей качества:

- статистической ошибки (“увода”), т. е. величины смещения температуры

объекта термостатирования в стационарном режиме при изменении температуры окружающей среды в максимальном диапазоне;
- динамической ошибки термостатирования – величины отклонения температуры объекта от стационарного уровня, вызванного работой регулятора температуры при постоянной температуре окружающей среды;
- времени выхода в режим – времени от момента включения термостата до момента, когда температура на объекте термостатирования достигает и остается в заданных пределах.

В настоящей лабораторной работе ставится задача определения динамической ошибки термостатирования и времени выхода в режим подогревного термостата с двухпозиционным регулятором температуры.

Принцип действия и состав системы регулирования

Как правило, при разработке системы регулирования малогабаритного термостата ставится задача получения равномерного температурного поля. С этой целью термостатируемое тело помещают в камеру из материала с высокой теплопроводностью. Для уменьшения влияния условий внешней среды камеру окружают слоем теплоизоляции. Типовая конструкция термостата для кварцевых резонаторов представлена на рис.3.

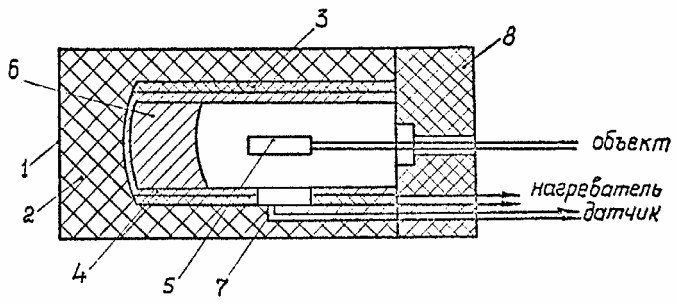


Рис. 3.

1 - кожух
2 - теплоизоляция
3 - нагреватель
4 - камера
5 - термостатируемое тело
6 - пенопласт
7 - датчик температуры
8 - крышка

Система регулирования температуры основана на следующем принципе: приток тепла к термостатируемому телу меняется при отклонении температуры тела от заданного значения. Структурная схема системы регулирования температуры показана на рис.4. С камерой термостата 1 соединен чувствительный элемент (датчик) 2, воспринимающий отклонение температуры от заданного значения.

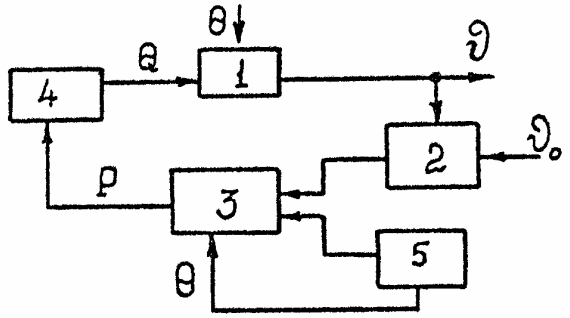


Рис. 4.
Структурная схема системы регулирования температуры

Сигнал чувствительного элемента преобразуется усилителем 3 и подается на исполнительное устройство 4, изменяющее приток тепла к камере термостата. Внешнее возмущение действует не только

на термостат, но и на элементы регулятора. Для компенсации ошибок часто используется еще один чувствительный элемент 5, реагирующий на изменение внешних условий.

Регулятор, используемый в лабораторной работе, представляет собой конструкцию, установленную внутри корпуса рядом с используемым термостатом. Схема регулятора представлена на рис.5.

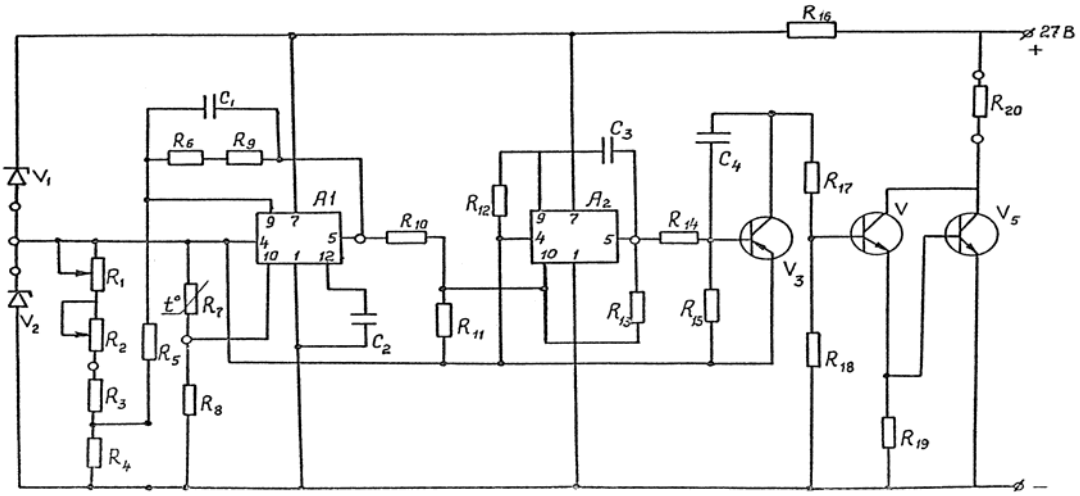


Рис. 5. Схема регулятора температуры

Здесь резисторы R_1 и R_2 являются подстроечными: R_2 для “грубой”, а R_1 – для “точной” настройки на необходимую температуру регулирования. Регулятор работает следующим образом.

Терморезистор $R7$ типа ММТ-4 3,6 кОм, устанавливаемый на регулируемый объект, образует с резисторами $R1$-$R4$ и $R8$ термочувствительный мост, подключаемый к выходу дифференциального усилителя постоянного тока $A1$, выполненного на операционном усилителе. Резисторы $R6$, $R9$ и конденсатор $C1$ включены в цепь отрицательной обратной связи. Усиленный сигнал разбаланса моста поступает на амплитудный дискриминатор $A2$. При достижении порога включения дискриминатор “опрокидывается” и включает выходной каскад – усилитель постоянного тока, работающий в ключевом режиме. На нагрузке, обозначенной на схеме $R20$, выделяется мощность, необходимая для поддержания на заданном уровне температуры объекта. При достижении заданной температуры настройки сигнал разбаланса моста уменьшается, амплитудный дискриминатор выключается и включает выходной каскад.

Характеристика двухпозиционного регулятора представлена на рис. 6. Зная зону неоднозначности в Омах: $0.5\cdot(R_{T1}-R_{T2})$, можно найти ε - зону неоднозначности регулятора в градусах [1]:

$$\varepsilon = \frac{1}{2}\left|T_2 - T_1\right|$$

$$T_{1,2} = \frac{B \cdot T_{cp}}{T_{cp} \cdot ln\left(\frac{R_{T_{1,2}}}{R_{T_{cp}}}\right) + B} \qquad (1)$$

где R_{T1} и R_{T2} – нижнее и верхнее значения сопротивления датчика температуры, при которых происходит переключение нагревателя; $R_{T\text{ср}}$ – сопротивление датчика при температуре окружающей среды (определяется по графику рис.12); T_1 и T_2 – значения температур в К, соответствующие сопротивлениям R_{T1} и R_{T2}; $T_{\text{ср}}$ – температура среды в К; B=2280 К.

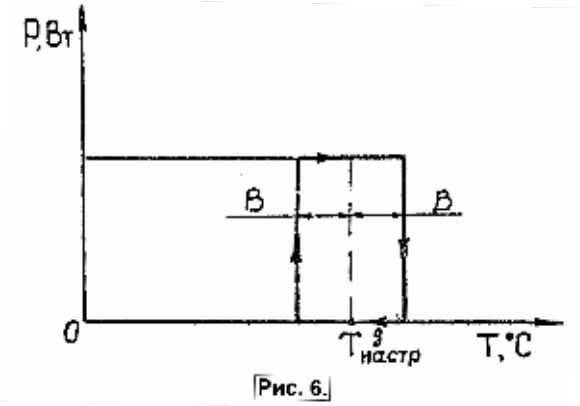


Рис. 6.

Регулятор, характеризующийся зоной неоднозначности 2·ε, настраивается на определенную температуру $t_{\text{дн}}$, соответствующую заданной температуре термостатирования объекта. Если значение температуры датчика находится ниже величины ($t_{\text{дн}}$-ε), происходит включение нагревателя термостата, под действием мощности $Q_{\text{н}}$ которого осуществляется разогрев всех элементов термостата (в том числе и датчика). В момент достижения датчиком температуры ($t_{\text{дн}}$+ε) происходит отключение нагревателя и последующее охлаждение термостата в таком режиме представлен на рис.7. Этот режим работы характеризуется:

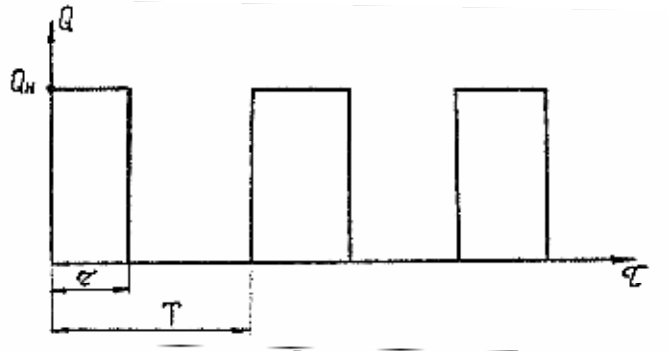


Рис. 7.
Характеристика работы нагревателя термостата при двухпозиционном регулировании

1. периодом $T_{\text{н}}$ включения мощности;
2. скважностью подачи мощности γ

$$\gamma = \frac{\tau}{T_H} \qquad (2)$$

Установившийся режим работы термостата, соответствующий рис.7, принято называть квазистационарным или режимом автоколебаний. Отличительной особенностью этого режима является наличие устойчивых гармонических колебаний температур каждого из элементов термостата вокруг соответствующего им стационарного уровня. Причем интегральное значение температуры элемента за период колебаний может отличаться от рассчитываемого (в предположении идеального регулятора) стационарного значения в силу несимметричности колебаний. Таким образом, нестационарный режим работы термостата (квазистационарный) характеризуется амплитудой автоколебаний температур элементов и величиной смещения температур от стационарного значения – статистической составляющей динамической ошибки.

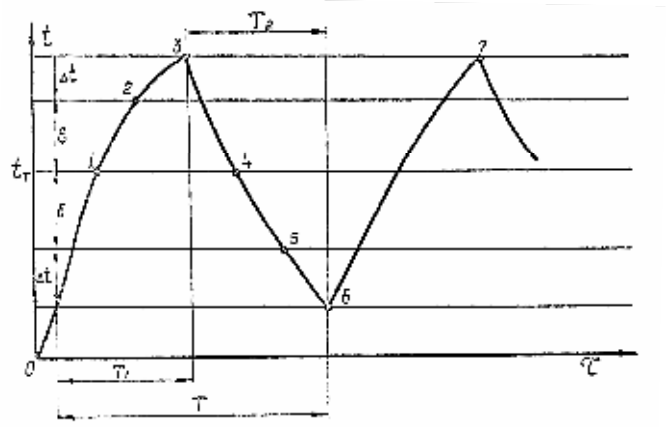


Рис. 8.

Графики автоколебаний представлены на рис.8. В точке 1, соответствующей температуре термостатирования. Нагревание объекта не прекращается, а продолжается за счет нечувствительности регулятора ε дальше, до точки 2. Зона нечувствительности 2·ε складывается в основном, из величины, обусловленной тепловой инерцией датчика и величины, обусловленной временем срабатывания реле.

В точке 2 произойдет отключение нагревательного элемента. Однако температура будет еще возрастать до точки 3 вследствие тепловой инерции объекта Δτ, а затем начнет падать до кривой 3-6. В точке 5 произойдет включение нагревателя.

Рассмотрим переходный режим работы термостата. Переходным процессом называется процесс перехода объекта от некоторого начального состояния к другому тепловому состоянию под воздействием внутренних и внешних тепловых воздействий.

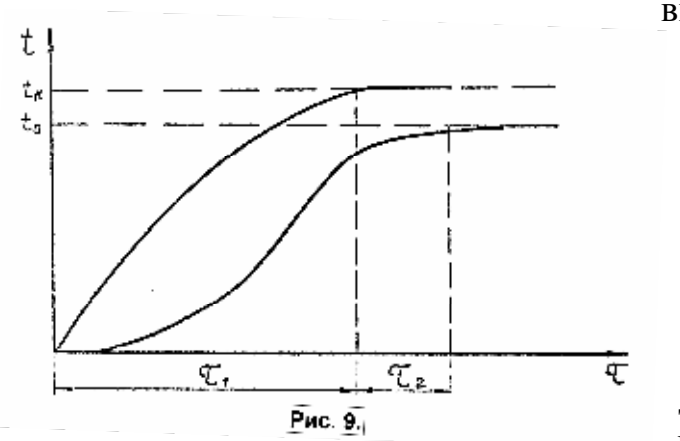


Рис. 9.

Переходный режим работы термостата можно условно разделить на два участка (рис.9):

- участок τ_1 - участок включения максимальной мощности термостата. Этот участок соответствует времени разогрева датчика до температуры настройки. Вследствие малого

термического сопротивления между датчиком и камерой термостата в инженерной практике считают, что к моменту τ_1 температура камеры соответствует ее стационарному значению;

- участок τ_2 - участок ”подтягивания” объекта в заданную зону термостатирования. Принимая допущение о постоянстве температуры камеры на этом участке, считают, что под действием избыточной температуры камеры относительно температуры объекта происходит его разогрев до заданного уровня.

Математическое описание тепловой модели термостатирования

Динамика термостата на основании закона сохранения энергии описывается системой термостатирования уравнений вида:

$$Q_H = C_K \cdot \frac{dt_K}{d\tau} + \sigma_{KO} \cdot (t_K - t_O) + \sigma_{KД} \cdot (t_K - t_Д) + \sigma_{KC} \cdot (t_K - t_C) \qquad (3)$$

$$\sigma_{KO} \cdot (t_K - t_O) = C_O \cdot \frac{dt_O}{d\tau} + \sigma_{OC} \cdot (t_O - t_C) \qquad (4)$$

$$\sigma_{KД} \cdot (t_K - t_Д) = C_Д \cdot \frac{dt_Д}{d\tau} + \sigma_{ДC} \cdot (t_Д - t_C) \qquad (5)$$

где $Q_н$ – мощность нагревателя термостата, Вт; $C_к$, $C_о$, $C_д$ – массовые теплоемкости камеры, объекта и датчика, Дж/К; $t_к$, $t_о$, $t_д$ – температуры камеры, объекта, датчика, С; σ_{ij} - тепловые проводимости между элементами термостата (и принимают значения индексов *“к”, “о”, “д”, “с”,* соответствующих камере, объекту, датчику, среде), Вт/К.

Температура настройки датчика рассчитываются по формуле [1]

$$t_{ДН} = \frac{\eta}{\mu} \cdot t_T + (1 - \frac{\eta}{\mu}) \cdot t_C \qquad (6)$$

где t_m - температура термостатирования объекта, С.

В исследуемой лабораторной установке температура термостатирования установлена равной t_m=t_o=52,5 С; t_c – температура окружающей среды, С.

$$\eta = \frac{\sigma_{KД}}{\sigma_{KO} + \sigma_{ДC}}; \qquad \mu = \frac{\sigma_{KO}}{\sigma_{KO} + \sigma_{OC}}. \qquad (7)$$

С учетом введенных обозначений температура камеры в стационарном режиме определяется по формуле

$$t_K = \frac{1}{\mu} \cdot t_T + (1 - \frac{1}{\mu}) \cdot t_C \qquad (8)$$

Определение времени выхода в режим.

Длительность участка можно определить из уравнения [1]

$$t_K - t_C = \frac{Q_H}{\sigma_{KC} + \mu \cdot \sigma_{ДС} + \mu \cdot \sigma_{OC}} \cdot \left[1 - \frac{r_2 + \frac{1}{T_K^*}}{r_2 - r_1} \cdot \exp(r_1 \cdot \tau_1) + \frac{r_1 + \frac{1}{T_K^*}}{r_2 - r_1} \cdot \exp(r_2 \cdot \tau_1) \right], (9)$$

где $T_K^* = \dfrac{C_K}{\sigma_{KC} + \mu \cdot \sigma_{ДС} + \sigma_{KO}}$.

Постоянные r_1 и r_2, входящие в (9), в лабораторной работе равны

$$r_1 = -0.06 \cdot 10^{-2} \quad r_2 = -0.7 \cdot 10^{-2}$$

Длительность участка τ_2 определяется по формуле

$$\tau_2 = T_O \cdot \ln\left(\frac{t_T - t_{01}}{\Delta} \right), \qquad (10)$$

где Δ - точность достижения температурой объекта своего стационарного значения; t_{01} – температура объекта в момент $\tau=\tau_1$.
t_{01} можно рассчитать по формуле

$$t_{01} = t_C + \frac{\mu \cdot Q_H}{\sigma_{KC} + \mu \cdot \sigma_{ДС} + \mu \cdot \sigma_{OC}} \cdot \left[1 - \frac{r_2}{r_2 - r_1} \cdot \exp(\tau_1 \cdot r_1) + \frac{r_1}{r_2 - r_1} \cdot \exp(\tau_1 \cdot r_2) \right], (11)$$

А общее время выхода в режим равно

$$\tau=\tau_1+\tau_2. \qquad (12)$$

Определение времени τ_1 значительно упрощается, если учесть, что начальный участок экспоненты возрастания температуры (рис.9) близок к линейному.

$$\tau_1 \approx \frac{(t_{ДН} + \varepsilon - t_{C)}}{Q_H \cdot \mu} \cdot C_K \qquad (12а)$$

В этом случае время достижения в камере температуры, определяемой выражением (9), можно вычислить по приближенной зависимости [1].

Расчет режима автоколебаний

Параметры режима автоколебаний рассчитываются по следующим формулам:

1) амплитуда автоколебаний датчика

$$A_Д = \sqrt[3]{\frac{T_Д \cdot T_K}{\left(T_Д \cdot T_K\right)^2} \cdot \frac{\eta}{\sigma_{KC}} \cdot \frac{2 \cdot Q_H \cdot \varepsilon^2}{\pi \cdot \sin(\pi \cdot \gamma)}} \qquad (13)$$

где γ - коэффициент скважности

$$\gamma = \frac{\sigma_{KC} \cdot (t_{ДН} - t_C)}{\eta \cdot Q_H}. \qquad (14)$$

2) частота автоколебаний

$$\omega = \frac{2 \cdot \eta \cdot Q_H \cdot \varepsilon}{\pi \cdot (T_K + T_Д) \cdot \sigma_{KC} \cdot A_Д^2}. \qquad (15)$$

3) величина смещения температуры датчика

$$\Delta_Д = A_Д \cdot \cos(\pi \cdot \gamma). \qquad (16)$$

4) амплитуда автоколебаний объекта

$$A_O = \frac{\mu}{\eta} \cdot \sqrt{\frac{1 + \omega^2 \cdot T_Д^2}{1 + \omega^2 \cdot T_O^2}} \cdot A_Д. \qquad (17)$$

5) величина смещения температуры объекта

$$\Delta_O = \frac{\mu}{\eta} \cdot \Delta_Д . \qquad (18)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Лабораторная установка скомпонована из четырех блоков, расположенных на общей стойке (рис.10). Испытуемый термостат расположен внутри блока №1. В этот же блок помещены автоматический регулятор температуры и переключатель режимов работы. Питание регулятора и нагревателя термостата осуществляется от источника постоянного напряжения Б5-44. Величина рабочего напряжения равна 27+-2,7 В.

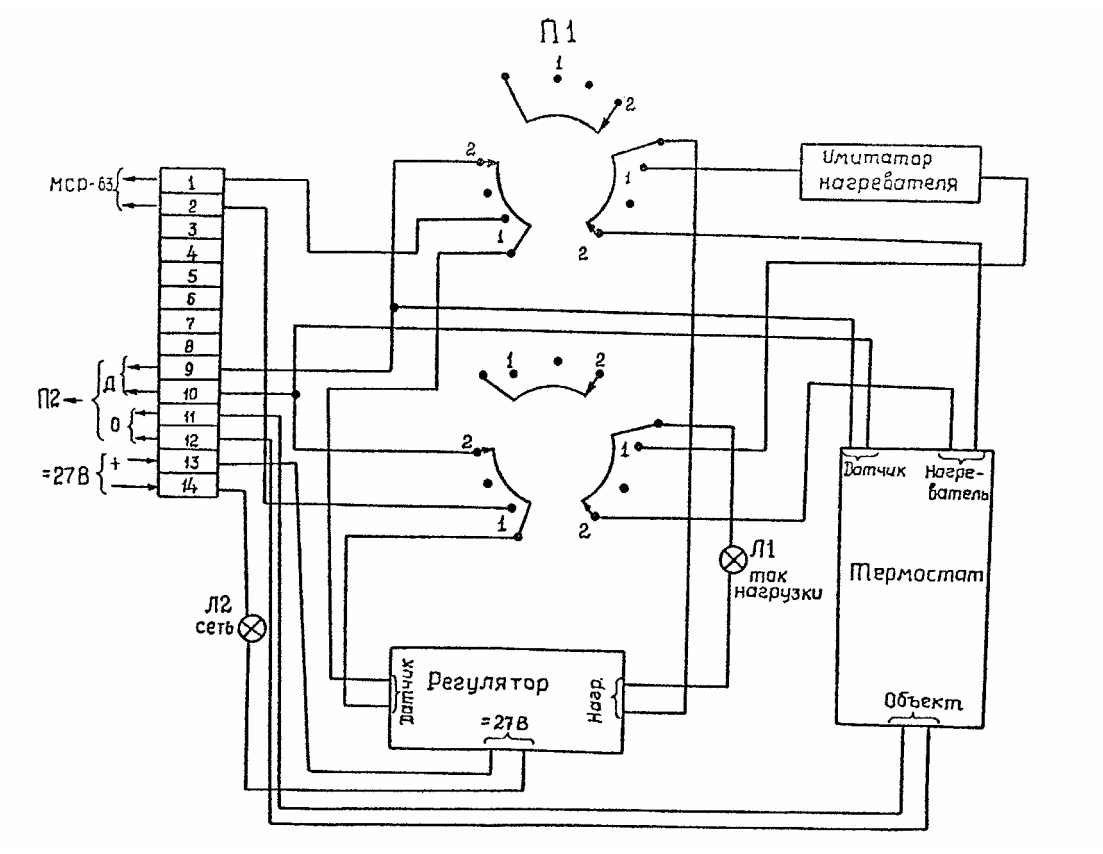


Рис. 11. Электрическая схема блока №1.

Для регистрации сигналов с объекта термостатирования и чувствительного элемента используется вольтметр универсальный В7-16. Четвертым блоком является магазин сопротивлений МСР-63, при помощи которого определяется зона неоднозначности двухпозиционного регулятора.

Лабораторная работа проводится в два этапа. Сначала определяется зона неоднозначности регулятора, а затем измеряются параметры динамического режима.

Перед началом работы подключить цифровой вольтметр В7-16 к сети и включить на нем тумблер питания. Прибор должен нагреваться в течение 30 минут. Режимы работы приборов лабораторной установки:

а) источник питания: напряжение – 27 В, ток – 0,5 А;

б) вольтметр универсальный: напряжение на датчике – 1,0-0,75 В, сопротивление объекта – 1,5-4,0 кОм.

Определение зоны неоднозначности регулятора.

1. Переключатель П1 на блоке №1 установить в положение “1”. При этом согласно схеме рис.11 в качестве нагрузки R_{20} регулятора подключается постоянное сопротивление величиной 51 Ом, а в качестве чувствительного элемента вместо датчика температуры подключается магазин сопротивлений.
2. Подключить к сети источник питания Б5-44 и включить на нем тумблер “сеть”. Убедиться, что на источнике выставлено напряжение 27 В и ток 0,5 А. При этом загорается лампочка “сеть”.
3. Изменение сопротивления магазина добиться появления тока в нагрузке (об этом сигнализирует лампочка “ток нагрузки”) и отметить это сопротивление (R_{T1}). Затем, уменьшая сопротивление магазина, добиться исчезновения тока (лампочка при этом должна погаснуть) и отметить это сопротивление (R_{T2}). Разность полученных значений характеризует зону неоднозначности в Омах.

Определить зону неоднозначности регулятора ε по формуле (1).

Расчет температур термостатирования камеры и настройки датчика

1. Значение $t_к$ рассчитать по формуле (8).
2. Значение $t_{дн}$ найти по формуле (6).

В формулах (6) и (8) температуру термостатирования принять

$t_m=t_o$=52,5 С.

Данные для расчетов берутся из таблицы 1.

Таблица 1

$\sigma_{кс}$	$\sigma_{ко}$	$\sigma_{кд}$	$\sigma_{ос}$	$\sigma_{дс}$	η	μ	$T_к$	$T_о$	$T_д$	$T_к^*$
$4{,}7\cdot10^{-2}$	$6{,}5\cdot10^{-2}$	$4{,}0\cdot10^{-2}$	$1{,}8\cdot10^{-3}$	$2{,}1\cdot10^{-2}$	0,995	0,973	1565	165	159	656

3. Для допустимой заданной зоны термостатирования Δ=0,1К определить время выхода термостата в режим по формулам (9)-(12) при $Q_н$=2,55 Вт.

4. По формулам (13)-(18) определить параметры режима автоколебаний при найденных ε, $t_{дн}$, $Q_{н}$=2,55 Вт.

5. Провести экспериментальную проверку полученных результатов. Для этого:

- Переключатель П1 на блоке №1 установить в положение “2”. При этом согласно схеме рис.11 в качестве нагрузки R_{20} регулятора подключается нагреватель термостата, а в качестве чувствительного элемента подключается терморезистор, установленный в испытуемом термостате.
- Тумблер П2 установить в положение 1 (объект) (сопротивление R_o), а прибор В7-16 установить на режим измерения сопротивлений. При этом прибор В7-16 будет показывать сопротивление R_o объекта.
- С интервалом Δτ=1 мин регистрировать показания прибора, измеряющего сопротивление объекта.
- Убедившись в наступлении режима автоколебаний поочередно зафиксировать зависимости $R_o=R_o(\tau)$ и $U_д=U_д(\tau)$ с интервалом $\Delta\tau$=(3-5) с. Результаты занести в таблицу:

τ, с	$R_о$, Ом	$t_о$, °С	$U_д$, В	$R_д$, Ом	$t_д$, °С

Достижение режима автоколебаний характеризуется включением и выключением лампочки “ток нагрузки” через одинаковые промежутки времени.

Для измерения напряжения $U_д$ необходимо:

- тумблер П2 поставить в положение 2 (датчик) (напряжение $U_д$);
- прибор В7-16 установить на режим измерения напряжений.

В таблице 2 величина $R_д$ рассчитывается по формуле:

$$R_д = \frac{U_д}{U_0 - U_д} \cdot R_0, \qquad (19)$$

где R_o=9,09 кОм, U_o=5,79 В, а величины $t_o=t_o(\tau)$ и $t_д=t_д(\tau)$, соответствующие зависимостям $R_o(\tau)$ и $R_д(\tau)$ снимаются по графикам рис.12.

6. Построить графики:

а) переходного процесса объекта;

б) режима автоколебаний.

7. Провести сравнение полученных результатов с результатами расчета:

а) $\delta_{\tau} = \dfrac{\tau_{эксп} - \tau_{расч}}{\tau_{расч}} \cdot 100\%$

б) $\delta_{нд} = \dfrac{\tau_{нд.эксп} - \tau_{нд.расч}}{\tau_{нд.расч}} \cdot 100\%$

в) $\delta A_{о} = \dfrac{A_{о.эксп} - A_{о.расч}}{A_{о.расч}} \cdot 100\%$

г) $\delta A_{д} = \dfrac{A_{д.эксп} - A_{д.расч}}{A_{д.расч}} \cdot 100\%$

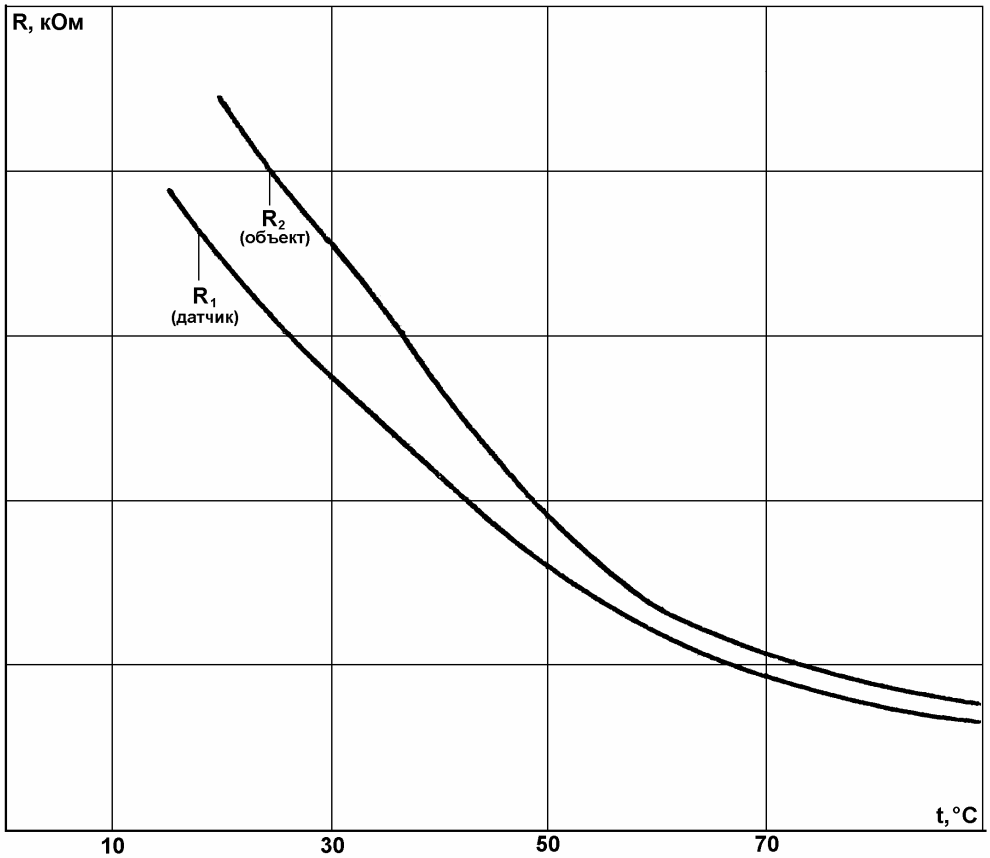


Рис. 12. Градуировочные характеристики.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Результаты измерения зоны неоднозначности регулятора в Омах;
2. Результаты расчета зоны неоднозначности регулятора в градусах;
3. Расчет стационарных значений температуры камеры $t_к$ и температуры настройки датчика $t_{дн}$;
4. Расчет времени выхода термостата в режим и параметров режима автоколебаний;
5. Таблица результатов эксперимантов;
6. Графики:
- переходного процесса объекта;
- режима автоколебаний
7. Сравнение расчетных и экспериментальных данных.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие приняты допущения при составлении модели термостата с сосредоточенными параметрами?
2. В чем преимущества и недостатки релейных систем регулирования по сравнению с пропорциональными системами регулирования?
3. На какие показатели качества и как влияет величина зоны неоднозначности двухпозиционного регулятора?
4. Что такое автоколебательный режим и при каких условиях он возникает в релейных системах?
5. Из каких составляющих складывается погрешность термостатирования? Дать определения всех составляющих погрешности и пояснить, чем обусловлена каждая из них.
6. От каких конструктивных и режимных параметров зависит динамическая погрешность термостатирования?
7. От каких конструктивных и режимных параметров зависит статистическая погрешность термостатирования?
8. Какими путями можно уменьшить время выхода термостата в режим?
9. Какие возмущающие воздействия могут вызвать нестабильность температуры объекта термостатирования?
10. Что является регулирующим воздействием в подогревном термостате?

ЛИТЕРАТУРА

1. Грабой Л.П., Ленская Л.П., Трощенко А.В. “Определение динамической ошибки регулирования двухпозиционного термостата”, Вопросы радиоэлектроники, ТРТО, вып. 1, 1971.

2. Ярышев Н.А., Андреева Л.Б. Тепловой расчет термостатов, Л., Энергоатомиздат, 1984.
3. Кейн В.М. Конструирование тнрморегуляторов, М., Сов. Радио, 1970.
4. Попов Е.П. Автоматическое регулирование и управление. М.,Физматиздат, 1962.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛЕЙНОГО ЭЛЕКТРОННОГО РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРЫ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ - исследование работы релейного регулятора температуры.

Описание работы установки

Нормальная работа почти всех приборов и агрегатов существенным образом зависит от постоянства температуры окружающей среды или среды их чувствительных элементов.

Примерами, когда необходимо с той или иной точностью поддерживать температуру на заданном уровне, могут служить: воздух камеры полупроводниковых элементов в радиоэлектронном аппарате, жидкость, взвешивающая чувствительный элемент трех степенного поплавкового гироскопа, и т. п. Заданная температура указанных сред при любых реальных температурных возмущениях должна автоматически поддерживаться регулятором, который вместе с объектом регулирования представляет систему стабилизации.

В процессе работы элемент или устройство подвергаются внешним и внутренним тепловым воздействиям. Внешние тепловые воздействия вызваны изменениями температуры окружающей среды и тепловым потоком, поступающим к границе объекта, внутренние - его собственными тепловыделениями. Системы стабилизации осуществляют тепловое управление объектом с целью формирования в нем температурного поля с требуемыми характеристиками.

В системах регулирования широкое распространение из-за своей простоты получили релейные регуляторы, работающие по принципу “включено-выключено”.

Объектом регулирования является печь. Внутри печи помещен металлический стержень, температуру которого надо автоматически поддерживать с определенной степенью точности на заданном уровне. Металлический стержень имеет два отверстия. В одно отверстие помещается электрический термометр сопротивления, а в другое ртутно-стеклянный термометр с ценой деления 0.1^{o}C, служащий для измерения температуры печи. Температура окружающего воздуха (среды) измеряется электрическим термометром сопротивления.

Анализ работы системы

Для анализа работы, рассмотренной выше системы регулирования температуры, необходимо составить уравнение состояния системы. Это уравнение можно получить из уравнений ее элементов (см. функциональную схему, рис.1).

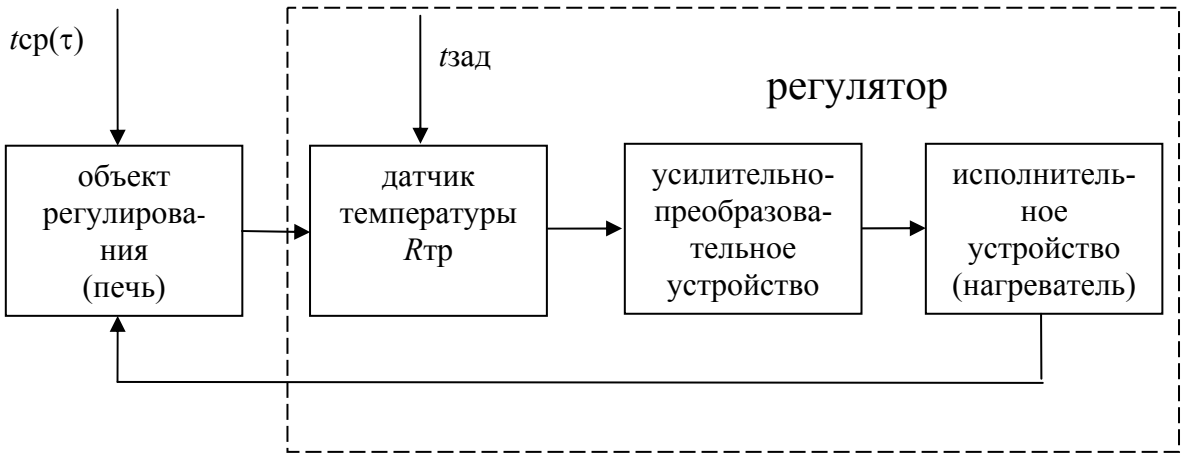


Рис.1. Функциональная схема системы регулирования температуры.

Обозначим через m массу печи, C- ее удельную теплоемкость, t-ее температуру, $t_{ср}$-температуру окружающего воздуха, S-площадь поверхности печи, α - коэффициент теплоотдачи поверхности. Температурное поле печи (корпус и объект) примем условно равномерным. Уравнение теплового баланса в произвольный момент времени при мощности нагрева $q_н$ будет:

$$mcdt + \alpha S\left(t - t_{cp}\right)dt = q_н d\tau . \qquad (1)$$

Разделив на $\alpha S d\tau$ обе части уравнения (1), получим уравнение объекта регулирования:

$$T_0 \frac{dt}{d\tau} + t = K_1 q_н + t_{cp} , \qquad (2)$$

где $T_0 = \dfrac{mc}{\alpha S}$ - постоянная времени объекта, $K_1 = \dfrac{1}{\alpha S}$ - коэффициент усиления объекта.

Уравнение (2) справедливо для участка нагрева, для участка охлаждения уравнение принимает вид ($q_н$=0):

$$T_0 \frac{dt}{d\tau} + t = t_{cp}. \qquad (3)$$

Обозначим произведение $K_1 q_н$ через q, тогда уравнение (2) будет таким:

$$T_0 \frac{dt}{d\tau} + t = q + t_{cp}. \qquad (4)$$

Решение уравнений (3) и (4) приводит к следующему выражению для изменения температуры печи:

$$t_н = C_1 Exp\left(-\frac{1}{T_o}\tau\right) + q + t_{cp} \qquad (5)$$

$$t_{ox} = C_2 Exp\left(-\frac{1}{T_o}\tau\right) + t_{cp}, \qquad (6)$$

где C_1 и C_2 - постоянные интегрирования, определяемые начальными условиями. Последним процесс регулирования в исследуемой системе, увязывая его с уравнениями (5) и (6).

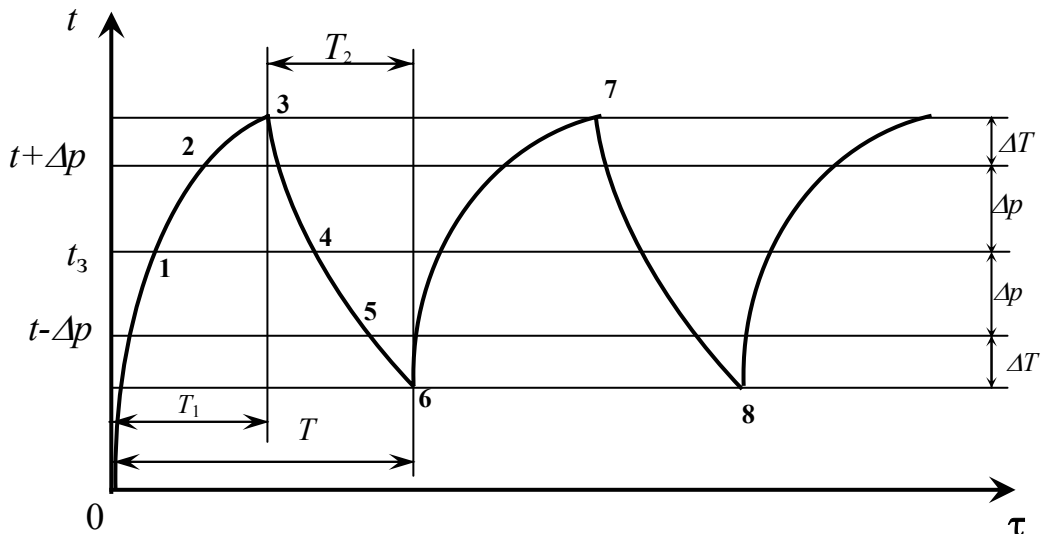


Рис.2.Зависимость температуры объекта от времени.

Как следует из характеристики (рис.2), нагревание объекта не прекращается в точке 1, соответствующей заданной температуре $t_з$, а продолжается за счет нечувствительности регулятора Δp дальше до точки 2. Величина нечувствительности регулятора Δp складывается в основном из величины обусловленной тепловой инерцией датчика (электрического термометра сопротивления) и величины, обусловленной временем срабатывания реле.

В точке 2 произойдет отключение нагревательного элемента. Однако температура будет еще возрастать до точки 3 вследствие тепловой инерции объекта $\Delta_Т$, а затем станет падать по кривой 3-6. В точке 5 произойдет включение нагревателя.

Изменение температуры на участках 0-3, 6-7 происходят по уравнению (5), а на участках 3-6, 7-8 по уравнению (6).

Для участков нагрева за начальные условия нужно принять значение температуры $t_З$-Δр-$\Delta_Т$, а для участков охлаждения $t_З$+Δp+$\Delta_Т$. Изображенный на рис.2 процесс регулирования можно построить по уравнениям (5), (6) методом “припасовывания”. Этот метод сводится к последовательному нанесению кривых процесса регулирования температуры по участкам. При нанесении кривых на границе участков конечное значение температуры предыдущего участка принимается за начальное значение последующего участка. Этим все решения по участкам связываются в единое целое решение.

При построении кривых процесса регулирования отсчет времени на каждом последующем участке удобно вести отсчет не от начала координат, а от конечной точки предыдущего участка. Определим основные параметры процесса регулирования температуры. Для этого воспользуемся уравнениями (5) и (6). Постоянная интегрирования C_1 определяется по начальной температуре $t_З$-Δр-$\Delta_Т$, а C_2 - по начальной температуре $t_З$+Δр+$\Delta_Т$. Решения (5) и (6), при этом принимают вид:

$$t_н = \left(t_з - q - t_{ср} - \Delta p - \Delta_T \right) \cdot exp\left(-\frac{1}{T_o}\tau \right) + q + t_{ср} \qquad (7)$$

$$t_{ох} = \left(t_з - t_{ср} + \Delta p + \Delta_T \right) \cdot exp\left(-\frac{1}{T_o}\tau' \right) + t_{ср}, \qquad (8)$$

где T_0- новая переменная времени, отсчитываемая от точки конца нагрева объекта (точка 3).

Исследуемый процесс регулирования температуры, как видно из рис.2, является автоколебательным, амплитуда колебаний $\Delta p+\Delta_T$, представляющая ошибку регулирования, и период T (рис.2) автоколебаний зависят от зоны нечувствительности регулятора и тепловой инерции объекта.

Вычислим значения периода T и его составляющих T_1 и T_2. Где T_1-время нагрева, T_2-время охлаждения. Для определения воспользуемся уравнением (7). Полагая $\tau=T_1$ и $t= t_3+\Delta p+\Delta_T$, получим следующее

$$T_1 = T_0 \cdot ln\left[1 - \frac{2\left(\Delta p + \Delta_T\right)}{t_з + \Delta p + \Delta_T - q - t_{ср}}\right]. \qquad (9)$$

Для определения T_2 воспользуемся уравнением (8). Полагая $\tau'=T_2$ и $t= t_3-\Delta p-\Delta_T$, получим

$$T_2 = T_0 \cdot ln\left[1 + \frac{2\left(\Delta p + \Delta_T\right)}{t_з - \Delta p - \Delta_T - t_{ср}}\right]. \qquad (10)$$

Уравнения (9) и (10) устанавливают связь между составляющими T_1 и T_2 и амплитудой ($\Delta p-\Delta_T$) автоколебаний. Период автоколебаний при этом $T=T_1+T_2$.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- Ознакомиться с теоретической частью лабораторной работы;
- Выставить ручку регулирования зоны неоднозначности регулятора в крайнее левое положение;

Зависимость мощности нагревателя P ($T_д$, $T_{н,\,д}$) от температуры датчика $T_д$ и температуры установки датчика $T_{н,д}$ определяется законом регулирования и при релейном регуляторе имеет вид

$$P\left(T_{\partial},T_{н,\partial}\right)=\begin{cases} P_{max} \text{ при } T_{\partial}-T_{н,\partial}<-b \text{ или при } -b\le T_{\partial}-T_{н,\partial}\le b;\ \dfrac{dT_{\partial}}{d\tau}>0 \\ 0 \quad \text{при } T_{\partial}-T_{н,\partial}>b \text{ или при } -b\le T_{\partial}-T_{н,\partial}\le b;\ \dfrac{dT_{\partial}}{d\tau}<0 \end{cases}$$

где b-зона неоднозначности регулятора; P_{max}- мощность нагревателя.

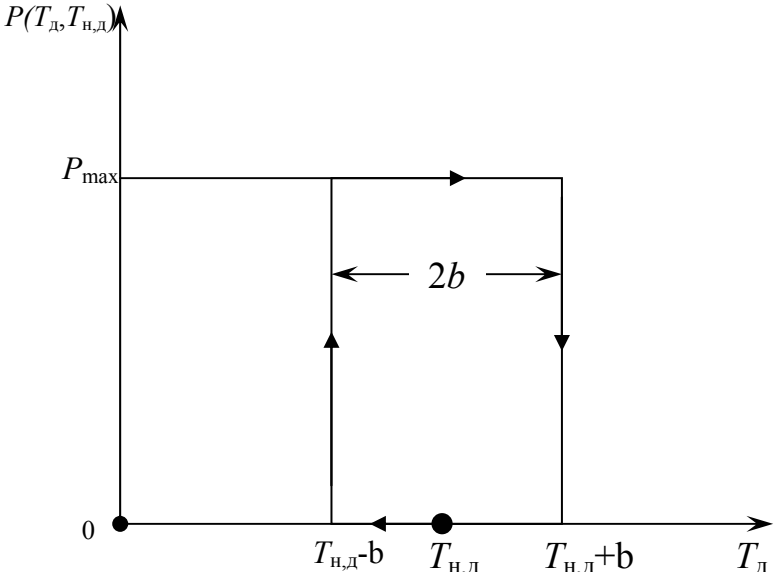


Рис. 3. График зависимости мощности нагревателя Р ($T_д$, $T_{н,д}$) от температуры датчика $T_д$.

Как видно из выше написанного зона неоднозначности оказывает непосредственное влияние на количество срабатываний реле, поэтому, так как ресурс практически любого реле ≈10000 срабатываний, рекомендуется для более надежной работы системы регулятор зоны неоднозначности выставлять на максимальное значение;

- Включить регулятор (должен загореться светодиод на передней панели прибора);
- Включить нагреватель печи. По указанию преподавателя установить на ЛАТРе напряжение (60-80 В);
- По показанию ртутно-стеклянного термометра снять кривую изменения температуры во времени для электронного регулятора. Значения температуры записывать через 1 мин. с точностью 0,5°С. Ориентируясь по переключению светодиода отметить моменты включения и выключения нагревателя. Значения температуры в момент срабатывания регулятора можно не записывать.

- Протокол испытаний оформить так:

τ		t	Положение регулятора
мин.	сек.	^{o}C	
			Включено “+” Выключено “0”

Пример оформления протокола испытаний:

τ		t	Положение регулятора
мин.	сек.	^{o}C	
15	00	101.5	0
16	00	100.0	0
17	00	99.0	0
18	00	98.5	0
18	25	-	вкл.
19	00	98.0	+
20	00	97.5	+

- В результате эксперимента должны быть получены данные для 4-х полных циклов (нагрев-охлаждение) процесса регулирования температуры $t(\tau)$ в зависимости от теплоемкости датчика и мощности нагревателя;
- Опыт выполнить для двух разных температур объекта (печи), по указанию преподавателя;
- Выключить нагреватель печи;
- Выключить регулятор;
- Построить кривые процесса регулирования температуры печи;
- По кривым процесса определить постоянную времени T_o объекта, величину нечувствительности Δp, величину Δ_T и приведенную мощность нагревателя q.

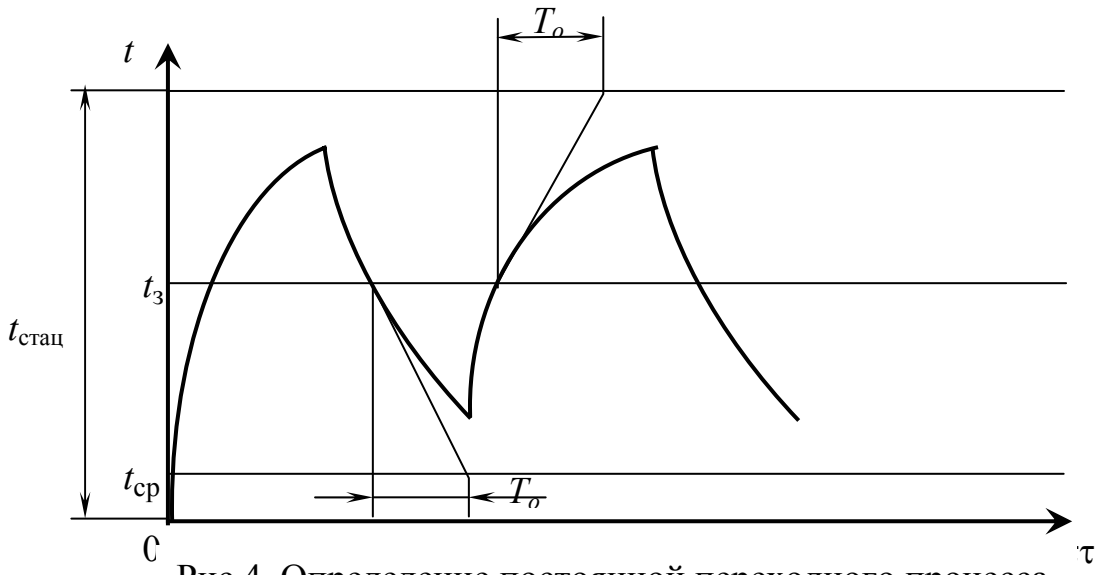


Рис.4. Определение постоянной переходного процесса.

Определение постоянной времени объекта T_o основано на том, что проекция касательной в любой точке кривой нагрева или охлаждения на асимптоту всегда равна T_o. Практически, постоянную T_o удобней определить по кривой охлаждения (рис.4), так же для нее асимптотой является известная температура $t_{ср}$. Приведенную мощность q следует определить графическим путем непосредственно из кривой процесса регулирования. Графический способ определения q вытекает из уравнения (7), описывающего процесс нагрева. Уравнение (7) описывает экспоненту, асимптота которой $t_{стац}$ при $\tau \to \infty$ определяется значением

$$t_{стац} = q + t_{ср}. \qquad (11)$$

Зная величину T_o и угол наклона касательной в точке а (рис.4), легко определить по экспериментальной кривой значение $t_{стац}$ и затем из (11) найти

$$q = t_{стац} - t_{ср}$$

- Сравнить величины T_1 и T_2 полученные экспериментально, с величинами T_1 и T_2, рассчитанными по формулам (9), (10);
- Провести качественный анализ влияния нечувствительности Δp и инерционности объекта Δ_T на частоту и амплитуду автоколебаний;
- Выявить влияние теплоемкости датчика, мощности нагревателя и температуры статирования на частоту и амплитуду автоколебаний;
- Сделать соответствующие выводы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.П. Попов, Автоматическое регулирование и управление. Физматгиз, 1963.
2. В.В. Солодовников (ред.), Основы автоматического регулирования. Машгиз, 1954.
3. В.М. Ерофеев, “Исследование релейных регуляторов температуры”. Руководство к лабораторным работам по теории автоматического регулирования, ЛИАП, 1962.
4. Г.Н. Дульнев и др. Методы расчета теплового режима приборов. – М.: Радио и связь, 1990.
5. Н.А. Ярышев, Л.Б. Андреева. Тепловой расчет термостатов.- Л.: Энергоатомиздат 1984.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ - определение переходных характеристик (переходных функций) объекта регулирования и чувствительного элемента, нахождение передаточных функций объекта и чувствительного элемента.

Переходные характеристики объекта и датчика регулирования

Система автоматического регулирования какого-либо параметра должна удовлетворять определённым требованиям, которые характеризуют качество системы в целом. Требования, предъявляемые к поведению системы регулирования, зависят от их назначения, однако, можно выделить следующие четыре категории:

- Требование к запасу устойчивости системы.
- Требования к величине ошибок в установившемся состоянии или к статической точности.
- Требования к поведению системы в переходном режиме.
- Требования к динамической точности системы, т.е. к величине ошибок при наличии непрерывно изменяющихся воздействий.

Система автоматического регулирования состоит из объекта регулирования и регулятора, который в свою очередь включает в себя целый ряд функциональных элементов (преобразователь, усилитель, элемент сравнения и т.д.).

Система регулирования будет удовлетворять заданным требованиям если каждый элемент её обладает заранее определенными свойствами. Поэтому для анализа динамических свойств системы необходимо знать характеристики отдельных элементов.

Подводимый к какому-либо элементу сигнал (входное воздействие, входная функция) перерабатывается и на выходе элемента получается новая величина (выходной сигнал, выходное воздействие). Например, для термопары, помещенной внутрь печи, входным воздействием является температура печи, а – выходной величиной – термо-э.д.с. термопары. Взаимосвязь между величинами на входе и на выходе зависит от свойств элемента системы. Наиболее удобной характеристикой этих свойств является так называемая передаточная функция элемента.

Обозначим входное воздействие через $x(\tau)$, а выходное – через $y(\tau)$. Применим к этим функциям преобразование Лапласа, тогда вместо $x(\tau)$ и $y(\tau)$ получим соответственно $X(s)$ и $Y(s)$, где s – параметр преобразования Лапласа [1].

Отношение этих величин $U(s) = \dfrac{Y(s)}{X(s)}$ называют передаточной функцией элемента (звена) системы автоматического регулирования. Зная выражение для передаточной функции, можно найти величину выходного воздействия $y(\tau)$ при любом заданном воздействии $x(\tau)$ на входе.

Передаточную функцию $U(s)$ звена удобно находить по переходной характеристике (переходной функции) звена.

Переходной характеристикой или переходной функцией звена называют изменение величины на выходе, если на входе звена подано так называемое единичное воздействие.

В лабораторной работе объектами исследования являются электрическая малоинерционная цепь и армированная термопара, характеризующая чувствительный элемент системы регулирования печи.

Предположим, что до момента времени τ_0 печь оставалась холодной и её температура равнялась $t_н$. В момент времени $\tau_0=0$ включается её нагреватель мощностью W_0 и печь начинает разогреваться. Тогда зависимость изменения температуры печи от времени и будет представлять переходную характеристику печи, как объекта регулирования (рис. 1).

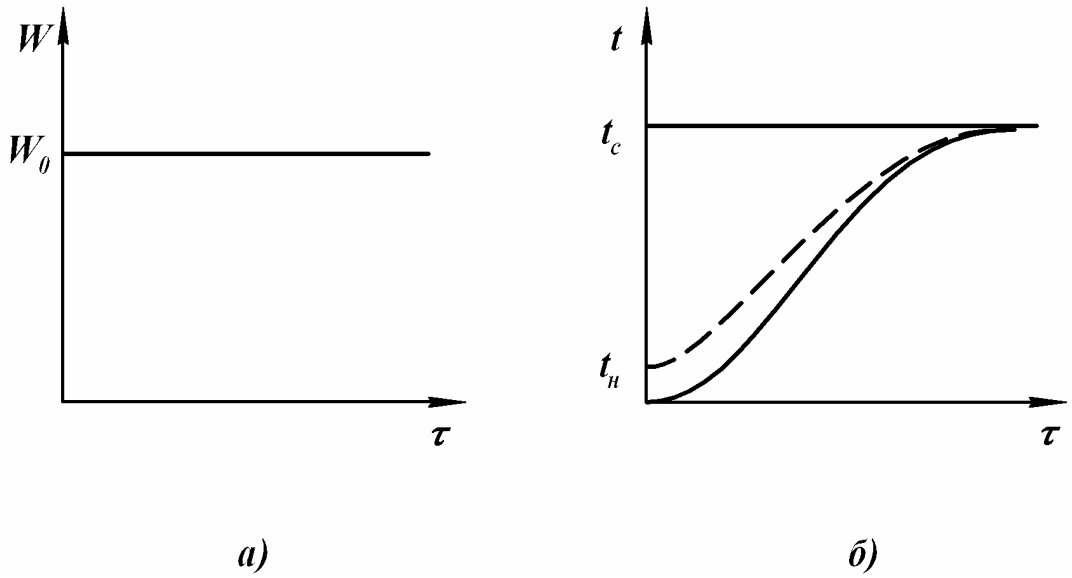


Рис. 1. Графики: а) выходное воздействие (единичная ступенчатая функция); б) выходная величина (температура печи)-переходная характеристика объекта (печи).

Переходная функция термопары характеризует изменение её электродвижущей силы в зависимости от времени, если термопара, предварительно имевшая температуру $t_н$ погружается в печь с температурой $t_с$ (рис. 2).

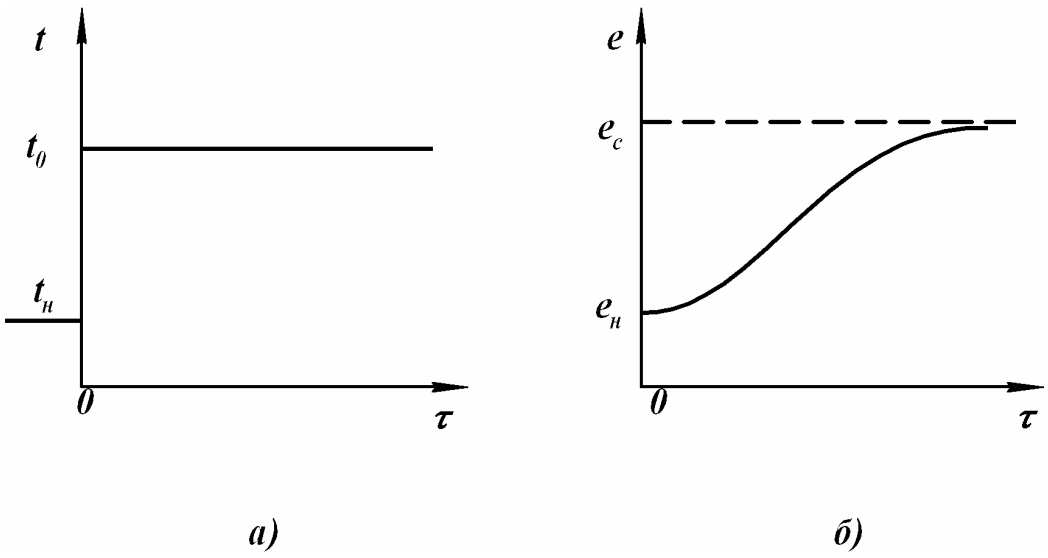


Рис.2. Графики входного воздействия (а) и выходной величины (э.д.с.термопары) (б). Кривая (б) - переходная характеристика чувствительного элемента (термопары).

Если известны аналитические выражения для переходных характеристик объекта и чувствительного элемента, то можно найти и их передаточные функции, которые определяют взаимосвязь между величинами на выходе (температура-печь, эдс-термопара) и произвольными изменениями величин на входе (мощность-печь, температура печи-термопара). В исследуемых нами объектах изменение температуры печи и эдс термопары во времени можно представить в виде суммы экспонент:

$$t(\tau) - t_H = (t_c - t_H)\left(1 - \sum_{i=1}^{n} A_i \cdot e^{-\tau / T_{обi}}\right) \quad (1)$$

$$e(\tau) - e_H = (e_c - e_H)\left(1 - \sum_{i=1}^{n} B_i \cdot e^{-\tau / T_{эi}}\right) \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) $t(\tau)$ и $e(\tau)$ текущие значения температуры и эдс, $t_н$ и $e_н$ – начальные, а $t_{стац}$ и $e_{стац}$ – установившиеся значения

температуры и эдс. Так как при $\tau = 0;\ t(0) = t_H$; $e(0) = e_H$, то $\sum_{i=1}^{n} A_i = 1$ и $\sum_{i=1}^{n} B_i = 1$. Коэффициенты A_i, B_i и постоянные времени объекта регулирования $T_{обi}$ (печь) и чувствительного элемента $T_{обi}$ (термопара) могут быть определены следующим образом.

Исследование многих звеньев систем автоматического регулирования показывает, что с ростом номера i коэффициенты A_i и B_i, постоянные времени $T_{обi}$ и $T_{эi}$ уменьшаются по своей абсолютной величине. Поэтому с увеличением времени τ влияние первых слагаемых рядов (1) и (2) становится все большим и большим и, наконец, начиная с некоторого времени τ_1, изменение $t(\tau)$ и $e(\tau)$ будет практически подчиняться зависимости:

$$t(\tau) - t_H \approx (t_c - t_H)\left(1 - A_i \cdot e^{-\tau/T_{обi}}\right), \tau > \tau_1 \qquad (3)$$

$$e(\tau) - e_H \approx (e_c - e_H)\left(1 - B_i \cdot e^{-\tau/T_{эi}}\right), \tau > \tau_1 \qquad (4)$$

Выражения (3) и (4) могут быть переписаны в виде:

$$\frac{t_c - t(\tau)}{t_c - t_H} = \sum_{i=1}^{n} A_i \cdot e^{-\tau/T_{обi}};\ \frac{e_c - e(\tau)}{e_c - e_H} = \sum_{i=1}^{n} B_i \cdot e^{-\tau/T_{эi}} \qquad (5)$$

$$\frac{t_c - t(\tau)}{t_c - t_H} = A_1 \cdot e^{-\tau/T_{об1}};\ \frac{e_c - e(\tau)}{e_c - e_H} = B_1 \cdot e^{-\tau/T_{э1}} \qquad (6)$$

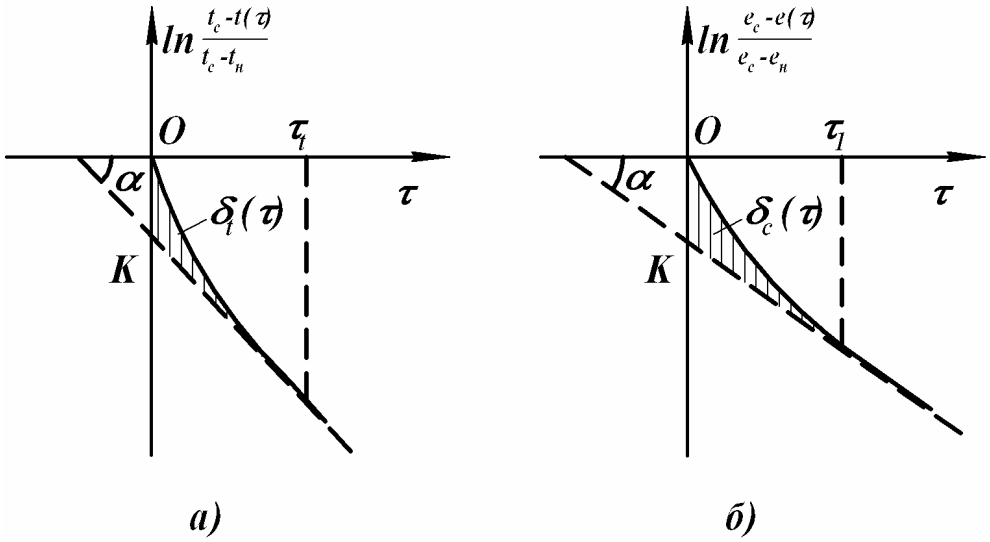
$$\tau > \tau_1,$$

если полученные из опыта зависимости $t(\tau)$ и $e(\tau)$ обработать в координатах $ln\frac{t_c - t(\tau)}{t_c - t_H}$, τ и $ln\frac{e_c - e(\tau)}{e_c - e_H}$, τ, то они качественно представятся в виде графиков (рис.3).

Начиная с некоторого момента времени $\tau=\tau_1$, эти зависимости становятся прямолинейными, т.е. вступает в силу закономерность (6). Прологарифмировав выражения (6), получим:

$$ln\frac{t_c - t(\tau)}{t_c - t_H} = ln\,A_1 - \frac{\tau}{T_{об1}};\; ln\frac{e_c - e(\tau)}{e_c - e_H} = ln\,B_1 - \frac{\tau}{T_{э1}} \qquad (7)$$

откуда видно, что котангенс угла α, образуемого пунктирной кривой с осью времени τ, численно равен первой постоянной времени печи $T_{об1}$ и термопары $T_{э1}$,



ctg $\alpha = T_{об1}$; Рис.3-а.

ctg $\alpha = T_{э1}$; Рис.3-б

а отрезки ОК, отсекаемые пунктирными линиями на оси ординат, численно равны $ln\,A_1$ и $ln\,B_1$.

Определение вторых постоянных времени $T_{об2}$ и $T_{э2}$ и коэффициентов A_2 и B_2 производится следующим образом. Из выражений (5) вычитаются соответствующие выражения (6), тогда остаются разности:

$$\Delta_t(\tau) = \sum_{i=1}^{n} A_i \cdot e^{-\tau/T_{обi}};\; \Delta_e(\tau) = \sum_{i=1}^{n} B_i \cdot e^{-\tau/T_{эi}}, \qquad (8)$$

которые по прошествии некоторого времени τ_2 переходит в простые экспоненциальные выражения:

$$\Delta_t(\tau) \approx A_2 \cdot e^{-\tau/T_{об2}};\; \Delta_e(\tau) \approx B_i \cdot e^{-\tau/T_{э2}} \qquad (9)$$

нахождение $\Delta_t(\tau)$и $\Delta_e(\tau)$ - смотри приложение.

Графическое построение зависимости (8) в координатах $ln\Delta_t$-τ и $ln\Delta_e$-τ и их обработка позволяет определить значения постоянных времени $T_{об2}$ и $T_{э2}$ и коэффициентов A_2 и B_2, подобно тому, как определялись первые постоянные времени $T_{об1}$ и $T_{э1}$ и коэффициенты A_1 и B_1.

Этот прием обработки может быть последовательно применен для определения высших постоянных времени и коэффициентов выражения (5). Следует, однако, заметить, что графические приемы построения не точны и уже погрешность нахождения третьих постоянных получается большой.

Для практических целей часто оказывается достаточным ограничиться в выражении (5) значениями $i=2$ или 3.

Введем безразмерную температуру Θ и эдс E:

$$\Theta(\tau)=\frac{t(\tau)-t_H}{t_c-t_H};\ E(\tau)=\frac{e(\tau)-e_H}{e_c-e_H}, \qquad (10)$$

тогда выражение для переходных функций примет вид:

$$\Theta(\tau)=1-\sum_{i=1}^{n}A_i\cdot e^{-\tau/T_{обi}}\ ;\ E(\tau)=1-\sum_{i=1}^{n}B_i\cdot e^{-\tau/T_{эi}} \qquad (11)$$

В общем случае, когда воздействие на входе какого-либо звена произвольное и равно $x(\tau)$, величина на выходе $y(\tau)$ может быть определена, если известна передаточная функция звена $U(s)$, равная отношению сигнала на выходе к сигналу на входе в изображениях, т.е.:

$$U(s)=\frac{Y(s)}{X(s)}$$

Если воздействие на входе представляет собой единичную ступенчатую функцию $X(s)=1/s$, то выходной сигнал представляет собой переходную характеристику системы, изображение которой обозначим через $Y_1(s)$. Следовательно

$$Y(s)=U(s)\cdot\frac{1}{s} \qquad (12)$$

и, зная изображение переходной функции, можно найти передаточную функцию исследуемого звена. Для рассматриваемых звеньев, применяя преобразование Лапласа к переходной характеристике печи и термопары (11), получим :

$$\Theta(s)=\frac{1}{s}-\sum_{i=1}^{n}\frac{A_i T_{обi}}{T_{обi}\cdot s+1};\ E(s)=\frac{1}{s}-\sum_{i=1}^{n}\frac{B_i T_{эi}}{T_{эi}\cdot s+1} \qquad (13)$$

подставляя значения $\Theta(s)$ и $E(s)$ вместо $Y_1(s)$ в выражение (12), находим передаточные функции печи $U_{об}(s)$ и термопары $U_{эл}(s)$:

$$U_{об}(s)=\frac{1}{W_0}\left(1-\sum_{i=1}^{n}\frac{A_i T_{обi}\cdot s}{T_{обi}\cdot s+1}\right)$$

$$U_{эл}(s)=\frac{1}{t_c-t_H}\left(1-\sum_{i=1}^{n}\frac{B_i T_{эi}\cdot s}{T_{эi}\cdot s+1}\right), \qquad (14)$$

где W_0 – изменение мощности при включении печи; $t_с$ – температура печи; $t_н$ – начальная температура термопары.

Зная передаточные функции звеньев можно определить их частотные характеристики, а также динамические свойства объекта и датчика при любом виде входных воздействий.

Экспериментальное определение переходных характеристик печи и армированной термопары

Экспериментальное определение переходных характеристик печи и армированной термопары в лабораторной работе приводится на установке, показанной на рис.4.

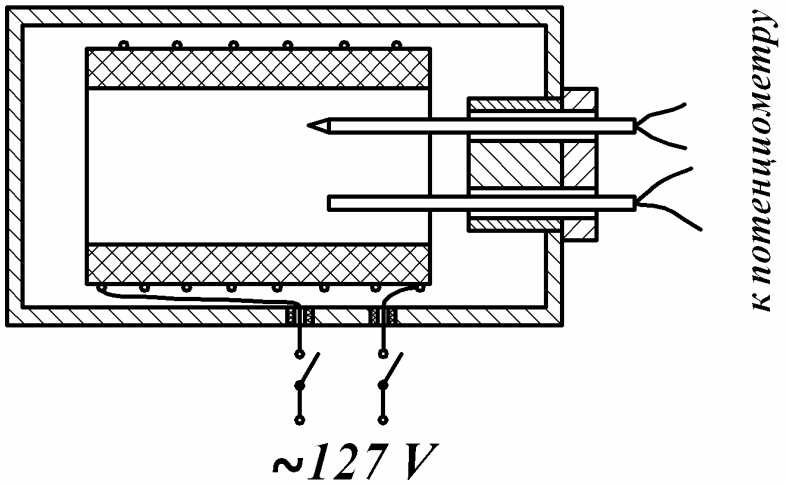


Рис. 4. Экспериментальная установка.

В пространстве печи установлен металлический стержень, в отверстиях которого могут быть размещены две хромель-алюмелевые термопары. Одна из термопар – малоинерционная – служит для измерения температуры печи, являющейся объектом регулирования. Другая армированная термопара является чувствительным элементом.

ЭДС термопар регистрируется электронным автоматическим самопишущим потенциометром, позволяющим получить изменение ЭДС термопар во времени.

Определение переходной характеристики печи осуществляется путем записи изменения ЭДС малоинерционной термопары во времени в процессе разогрева печи.

При установлении стационарного состояния (что регистрируется постоянством ЭДС малоинерционной термопары) в печь вводится армированная термопара и определяется переходная характеристика чувствительного элемента (термопары), путем записи изменения ее ЭДС во времени.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с теоретической частью лабораторной работы и описанием экспериментальной установки.
2. Ознакомиться с работой самопишущего электронного потенциометра (по описанию потенциометра).
3. Проверить электрическую схему нагревателя печи.
4. Установить малоинерционную термопару в пространство печи.
5. Включить потенциометр.
6. Включить одновременно самопишущий механизм потенциометра и нагреватель печи.
7. Снять график изменения температуры печи в процессе ее нагрева (до момента наступления стационарного режима).
8. Выключить самопишущий механизм потенциометра и сделать отметку на ленте.
9. Установить армированную термопару в пространстве печи, одновременно включив самопишущий механизм потенциометра.
10. Снять график изменения эдс армированной термопары во времени (до момента постоянства эдс во времени).
11. Выключить нагреватель печи и потенциометр.
12. Обработать полученные графики и построить переходные характеристики печи и термопары (рис.1 и 2).
13. Построить кривые (рис.3) и найти постоянные времени $T_{об1}$, $T_{об2}$, $T_{э1}$, $T_{э2}$ и коэффициенты A_1, A_2, B_1, B_2.

14. Определить передаточные функции печи и армированной термопары.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется передаточной функцией?
2. Какой метод применен для определения передаточной функции?
3. Как классифицируется инерционная термопара по передаточной функции?
4. Какого типа термопары применены в данной лабораторной работе?
5. Чем определяется время выхода объекта и термопары на стационарный тепловой режим?

ЛИТЕРАТУРА

1. Ярышев Н.А. Измерение нестационарных температур. Л.: Энергия, - 1967.
2. Температурные измерения. Справочник. //Геращенко О.А., Гордов А.Н., Лах В.И., Стаднык Б.И., Ярышев Н.А. – Киев. : Наукова думка, 1984.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСТАТА С ГАЗОНАПОЛНЕННОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБОЙ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ - ознакомление с основными принципами термостатирования объектов с внутренними источниками теплоты, где в качестве активных элементов используются газонаполненные тепловые трубы (ГТТ), и проведение эксперимента.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Ознакомление с конструкцией термостата и измерительными приборами.
2. Провести измерение температуры камеры термостата:

а) при постоянной мощности тепловыделений объекта и различных значениях температуры хладагента на участке конденсации.

б) при различных значениях мощности тепловыделений объекта и постоянной температуре хладагента на участке конденсации.

3. Рассчитать экспериментальное значение температуры камеры термостата для условий проведения эксперимента.
4. Составить отчет о проделанной работе.

Принцип действия газонаполненной тепловой трубы

Тепловая труба (ТТ) - испарительно-конденсационное герметичное устройство с использованием капиллярных сил, служащее для передачи теплоты и работающее по замкнутому циклу. На рис. 1 показана принципиальная схема газонаполненной тепловой трубы. Основными элементами газонаполненной тепловой трубы являются герметичный корпус 1, заполненный рабочей жидкостью 2 и насыщенным паром 3, капиллярная структура 4 и резервуар с неконденсирующимся инертным газом 5. На один конец тепловой трубы воздействует поток , снимаемый с объекта. Поток нагревает рабочую жидкость, и она начинает испаряться из капиллярной структуры (этот участок нагрева называется зоной испарения). Пар переносится к другому концу, подключенному к теплообменнику, и там конденсируется (зона конденсации). Поток пара $dm/d\tau$ и тепловой поток P связаны между собой соотношением $P=r\ dm/d\tau$ где r - удельная теплота парообразования, m - масса пара. Рабочая жидкость возвращается в зону испарения по капиллярной структуре (фитилю) под действием сил поверхностного натяжения. Транспортировка

жидкости может осуществляться как в поле силы тяжести (в том числе и противодействующем), так и при его отсутствии.

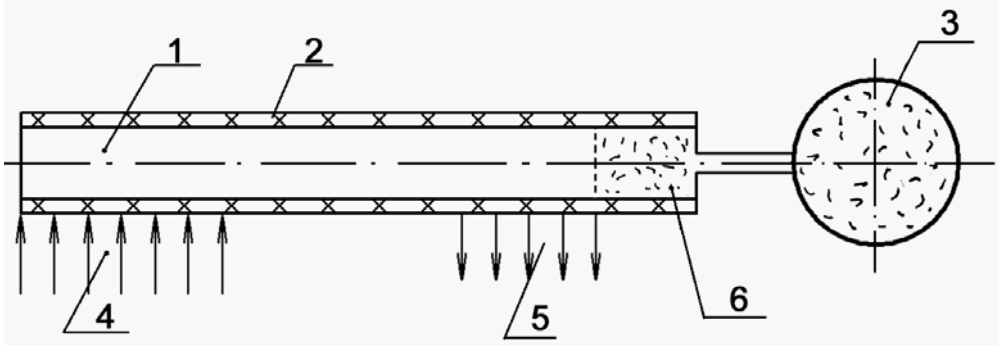


Рис.1 Газонаполненная тепловая труба

1 - паровой канал; 2 - капиллярная структура; 3 - резервуар с газом; 4 - участок испарения; 5 - участок конденсации; 6 - газовая пробка.

В ГТТ в качестве термостатирующего элемента предусмотрен резервуар с газом. При подведении потока пары теплоносителя оттесняют неконденсирующийся газ в зону конденсации, где при определенных условиях устанавливается резкая граница раздела “пар - газ”. В части поверхности зоны конденсации, которая соприкасается с неконденсирующимся газом, теплосброс отсутствует. Положение границы “пар - газ” определяется подводимой мощностью в зоне испарения, граничными условиями в зоне конденсации, параметрами газонаполненной тепловой трубы. При увеличении (уменьшении) теплового потока давление пара в полости ГТТ начинает возрастать (падать) и граница раздела за счет наличия объемного резервуара начнет смещаться вправо (влево). Длина зоны конденсации (зоны активного теплосброса) изменится и, таким образом, давление пара в трубе останется постоянным, что означает стабильную температуру пара в зоне испарения, то есть вблизи объекта.

Уровень термостатирования определяется массой инертного газа, так как от нее зависит смещение границы раздела “пар - газ”. Наличие резервуара позволяет получить объем газа значительно больший, чем объем, занимаемый парами рабочей жидкости. В зависимости от условий работы газового резервуара газонаполненные тепловые трубы делятся на:

1. ГТТ с “холодным резервуаром”;

2. ГТТ с “горячим резервуаром”.

Под “холодным” газовым резервуаром условно понимают такое конструктивное решение, при котором температура инертного газа в резервуаре не превышает температуры внешнего хладагента в зоне теплоотвода. В этом случае неизбежно попадание паров рабочей жидкости в резервуар и постепенное осушение тепловой трубы, поэтому в “холодном” резервуаре необходим фитиль, по которому рабочая жидкость, сконденсировавшаяся на “холодных” стенках, будет возвращаться в зону испарения. Кроме того, температура инертного газа будет существенно зависеть от температуры окружающей среды.

В том случае, когда температура инертного газа больше температуры хладагента в зоне конденсации ГТТ, газовый резервуар называется “горячим”. Такой резервуар не требует наличия фитиля, т. к. попадание паров жидкости в него исключается. Газонаполненная тепловая труба с “горячим” резервуаром выполняет более точный контроль температуры термостатируемого объекта, чем аналогичная ГТТ с “холодным” резервуаром.

Конструкция термостата с ГТТ

На рис. 2 схематично показан термостат с ГТТ. Объект термостатирования (1) помещен в камеру (2), выполненную из меди, к которой при помощи винтов и накладок (11) крепятся две тепловые трубы (3). Резервуар с инертным газом (4) закреплен в камере термостата. Он соединен с двумя участками конденсации тепловых труб при помощи соединительных трубок (5). Соединение двух тепловых труб с одним резервуаром обеспечивает равенство температур и давлений в их паровом пространстве. В зоне конденсации ГТТ расположен теплообменник (10), через который прокачивается вода. Камера с газонаполненными тепловыми трубами и газовым резервуаром соединена с основанием термостата (7) двумя стойками (6). Стойки крепятся к камере и основанию с помощью винтов через теплоизоляционные прокладки. Для уменьшения влияния колебаний температуры окружающей среды на температуру объекта камера помещается в теплоизоляционную оболочку (8), которая выполнена из пенопласта. Жесткость конструкции придает кожух (9).

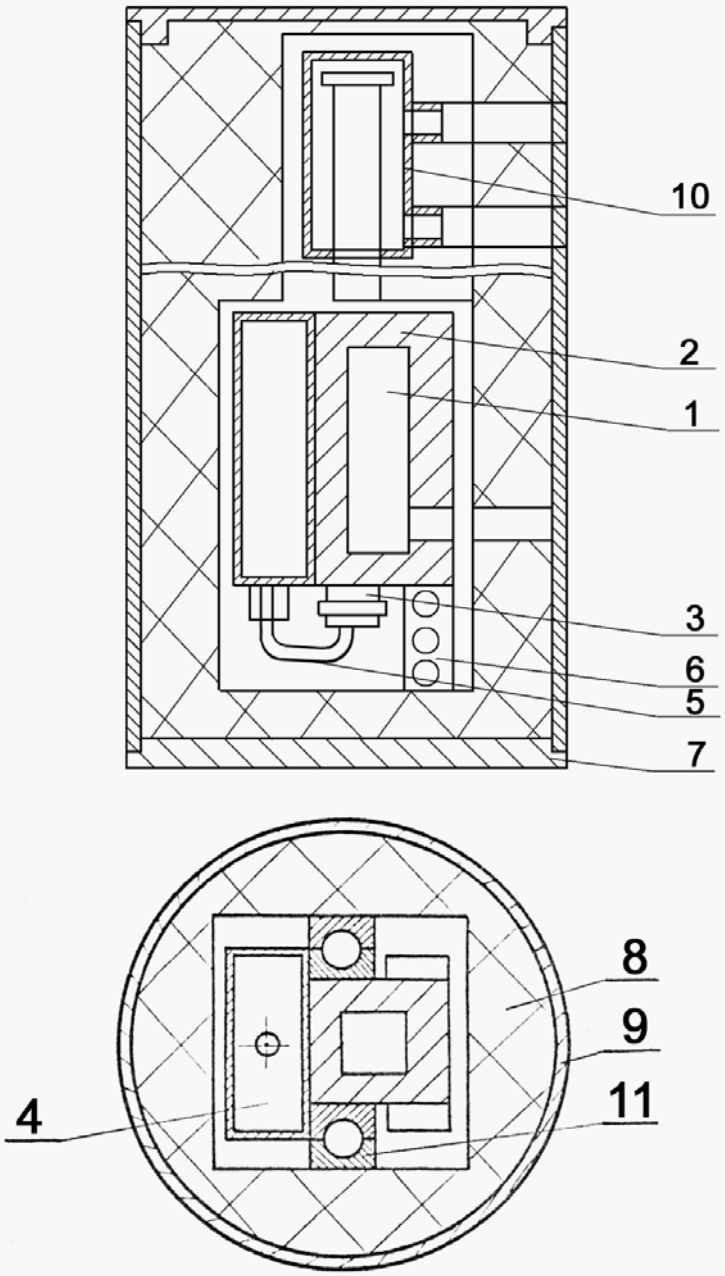


Рис.2 Термостат ГТТ

1 Объект
2 Камера
3 Тепловая труба
4 Резервуар с газом
5 Соединительная трубка
6 Стойка
7 Основание
8 Тепловая изоляция
9 Оболочка
10 Теплообменник
11 Накладка

Описание экспериментального стенда

Исследование свойств термостата с ГТТ проводится на стенде (рис. 4), который состоит из приборов питания (ЛАТР), измерения (вольтметр, ваттметр), и системы охлаждения (термостат UTU-2).

Питание источников тепла осуществляется переменным током промышленной частоты 50 Гц. Напряжение питания подается на источники теплоты от сети через лабораторный автотрансформатор (3) - ЛАТР-9А . ЛАТР подключен к ваттметру, по показаниям которого можно измерять мощность источника тепла, а также напряжение питания и ток. Ваттметр соединяется с термостатом через гнезда “нагрев 1 - нагрев 2”, причем использовать желательно два правых гнезда. Термостат с ГТТ имеет два резиновых шланга, которые должны быть присоединены к жидкостному термостату - UTU-2 (universal ultrathermostat). UTU-2 снабжен регулятором, что позволяет подавать воду определенной температуры к тепловым трубам, и, таким образом, охлаждать объект.

Температура измеряется в стационарном тепловом режиме медь-константановыми термопарами с диаметром электродов 0.12 мм. Показания регистрируются вольтметром. В корпус термостата с ГТТ вмонтирован переключатель термопар, расположение которых показано на рис. 3.

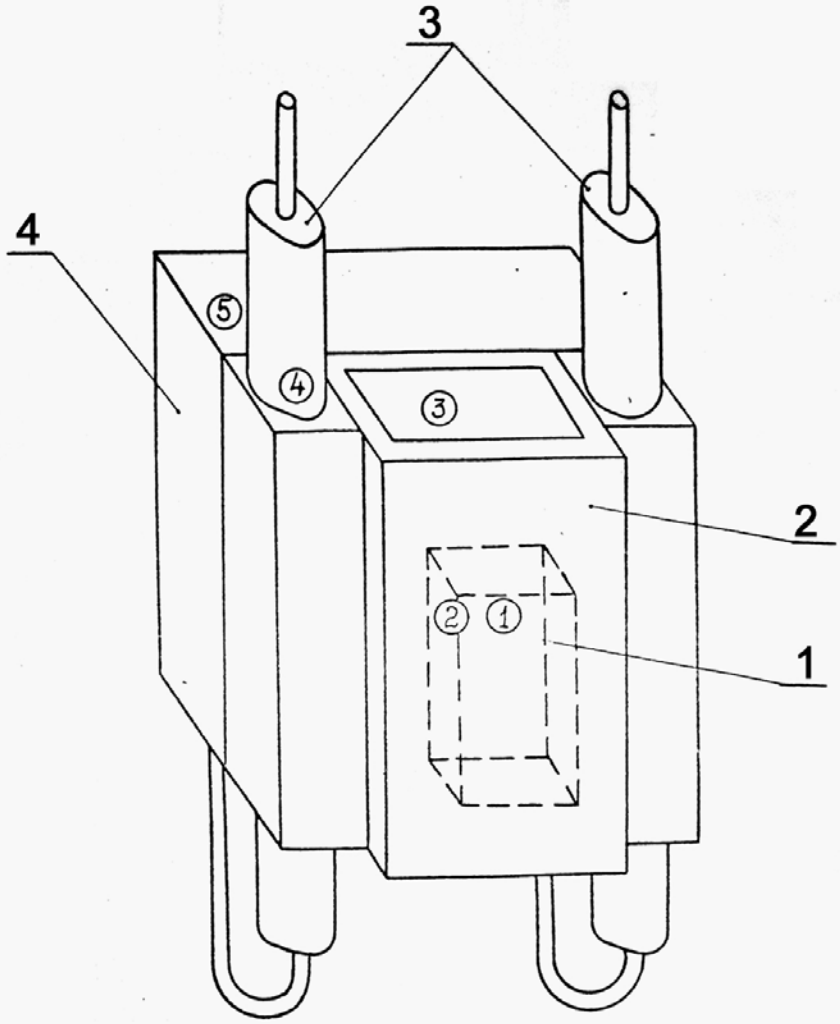


Рис.3 Схема крепления термопар

1 - Объект
2 - Камера
3 - Тепловые трубы
4 - Газовый резервуар
① - термопара в центре объекта
② - термопара с краю объекта
③ - термопара на камере объекта
④ - термопара на тепловой трубе
⑤ - термопара на газовом резервуаре
(между резервуаром и корпусом)

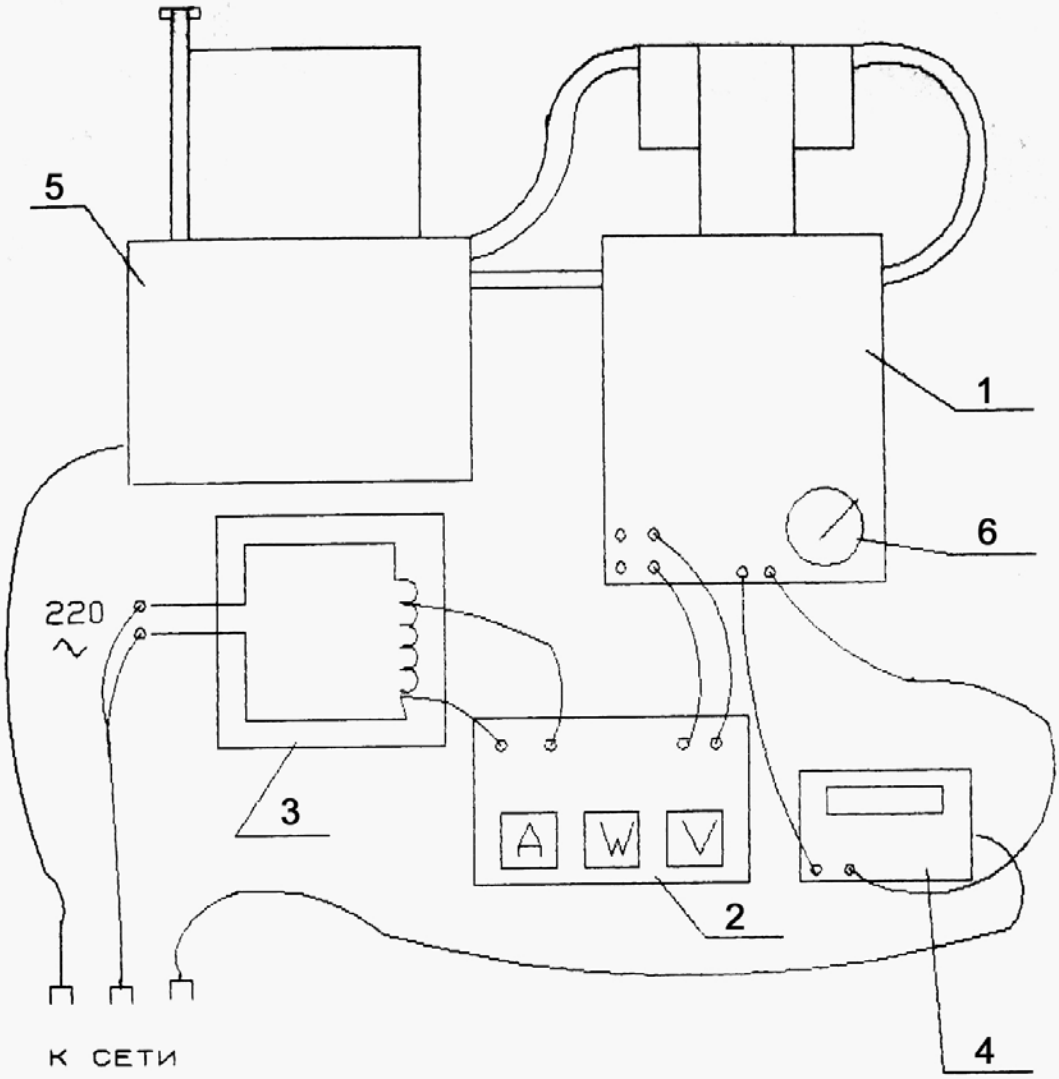


Рис. 4 Схема экспериментального стенда

1 - исследуемый термостат сГТТ
2 - ваттметр
3 - ЛАТР-9А
4 - цифровой вольтметр
5 - жидкостной термостат UTU-2
6 - переключатель термопар

ПОРЯДОК ПОДГОТОВКИ И ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

1. Подключить необходимые приборы и проверить схему установки.

2. Включить жидкостной термостат и его водяное охлаждение.

3. Снять зависимость температуры объекта от температуры хладагента на участке конденсации, для чего:

а) На UTU-2 установить температуру хладагента 10^0С.

б) Включить ЛАТР в сеть и подать питание на объект мощностью 20Вт.

в) Снять показания с термопар (номера 1-5) в стационарном режиме.

г) То же самое проделать для температур хладагента от 20^0 С до 60^0С через 10^0С.

4. Снять зависимость температуры объекта от величины мощности внутренних тепловыделений, для чего:

а) Установить температуру хладагента на термостате, равную 30^0С.

б) Включить ЛАТР в сеть и подать питание на объект мощностью 10 Вт.

в) Снять показания с термопар (номера 1-5), дождавшись выхода в стационарный режим.

г) То же самое проделать при мощностях тепловыделений объекта 20, 30, 40 и 50 Вт.

5. Выключить источник питания. Через 10 минут после этого выключить водяное охлаждение.

Обработка результатов измерений

1. Зная измеренные значения термоэдс, вычислить температуры соответствующих областей по формуле $\theta = kE$, где θ-перегрев относительно среды (^{o}С), E - значение термоэдс в мВ, k =25 К/мВ (коэффициент для медь-константановых термопар).

2. Определить среднеповерхностную температуру объекта.

3. Построить графики зависимостей температуры объекта от температуры хладагента и мощности тепловыделений.

Содержание отчета

1. Блок-схема установки.
2. Результаты измерений.
3. Графики перегревов.
4. Выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего предназначена тепловая труба?
2. В чем принципиальное отличие между обычной тепловой трубой и ГТТ?
3. Какой резервуар более выгодно иметь в ГТТ?
4. Что определяет максимальную зону конденсации в ТТ?
5. На какие параметры ГТТ влияет масса газа?
6. Как влияет положение термостата в пространстве на его работу?
7. В каких отношениях находятся паровой объем и объем с инертным газом?

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Н. Дульнев, А. П. Беляков. Тепловые трубы в электронных системах стабилизации температуры. М.: Радио и связь, 1985.
2. Под редакцией Э. Э. Шпильрайна. Тепловые трубы. М.: Мир, 1972.
3. А. В. Воронин, С. Д. Ревякин. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов. М., 1979.