

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Физический факультет
Кафедра радиофизики**

**Термостат на базе цифровой системы автоматического регулирования
Методические указания к лабораторной работе № 8
практикума по техническим средствам
автоматизации научных исследований**

Новосибирск 2013

Лабораторная работа посвящена способам построения систем автоматического регулирования. Студенту предлагается построить термостат с помощью нагревателя, датчика температуры, электроники управления нагревателями и аналого-цифрового преобразователя. Определив с помощью самостоятельно написанной программы инерционность системы, студент должен построить термостат, обладающий необходимым качеством стабилизации. Далее, используя термостат, студенту предлагается предложить методику и экспериментально определить теплоёмкость одного из образцов «неизвестного» металла.

Составитель

Фатькин Г. А.

Рецензент

Вахрушев Р. В.

Учебное пособие подготовлено в рамках реализации программы
развития НИУ-НГУ 2009-2018 г.г.

© Новосибирский государственный
университет 2013

Содержание

Введение

1. Автоматическое регулирование

1.1. Следящие системы

1.2. Устойчивость и быстродействие

1.3. Законы регулирования

1.4. Широтно-импульсная модуляция

1.5. Контрольные вопросы

2. Описание аппаратуры

3. Задания

Приложение

Список литературы

Введение

В технике широкое применение получили системы автоматического регулирования. Такие системы, например, могут выдерживать некоторые параметры эксперимента (влажность, температуру или другие) без участия человека. Более того, системы авторегулирования позволяют решать задачи, которые не под силу человеку в связи с быстротой протекающих процессов или большим объемом обрабатываемой информации. В этой работе вы ознакомитесь на практике с основами создания таких систем. Кратко приведены необходимые сведения из теории систем автоматического регулирования. Вам предстоит создать терморегулятор на базе датчика температуры, ЭВМ, АЦП и нагревателя, управляемого ключом. С помощью созданного терморегулятора вы измерите теплоёмкости стержней из различных металлов. Автор выражает благодарность Сенченко А. И. и Журавлёву А. А. за помощь в подготовке данного методического пособия.

1. Автоматическое регулирование

Под системой автоматического регулирования обычно подразумевается такая система, которая нужным образом изменяет либо поддерживает неизменным определённые физические величины в том или ином процессе. Примером такой системы является одно из древнейших устройств — регулятор потока воды, который был впервые применён Ктесибием Александрийским (285-222 г. до н.э.) в водяных часах, и описан в работах известного римского

инженера Марка Виртувия Поллиона [1]. Принцип работы такого регулятора становится понятен из его схемы, приведённой на рис. 1.

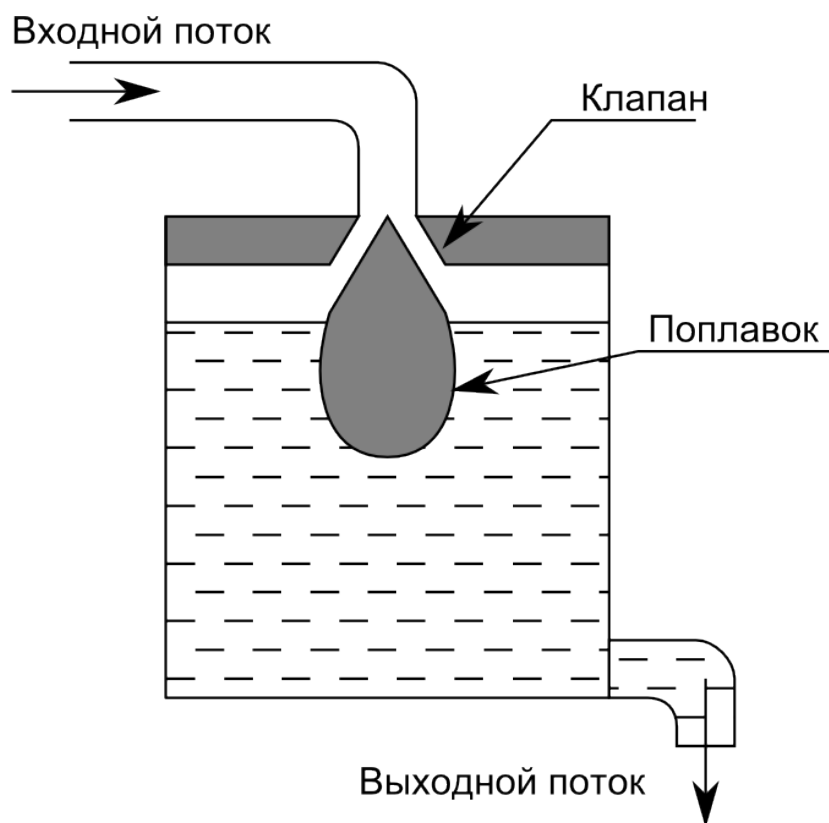


Рис. 1: Регулятор потока воды

С помощью поплавка специальной формы организуется клапан, который сохраняет выходной поток постоянным, вне зависимости от входного потока. Действительно, стоит входному потоку увеличиться, как уровень воды в сосуде поднимется и поплавок всплывёт, что приведёт к частичному закрытию клапана и, соответственно уменьшению притока воды в сосуд. И наоборот, при уменьшении входного потока, поплавок опустится, клапан приоткроется и приток воды в сосуд увеличится. Таким образом достигается постоянство выходного потока воды. Стоит отметить, что точность водяных часов, построенных на основе такого механизма, оставалась непревзойдённой вплоть до изобретения механических часов в XVII веке.

Теория систем автоматического регулирования на настоящий момент обширна и развита. В данном пособии мы постараемся дать лишь необходимый для выполнения работы минимум сведений по этой теме, не претендуя на полноту изложения. Кое-где упущены даже существенные моменты теории, например вовсе не рассматриваются преобразования Лапласа и соответствующие методы рассмотрения поведения систем на основе описывающих их уравнений. Желаящим подробнее ознакомиться с теорией систем автоматического регулирования рекомендуется пособия [2,3].

1.1. Следящие системы

Следящая система — это система, в которой управляемая величина воспроизводит произвольное задающее воздействие. Общая для следящих систем схема изображена на рис. 2. На вход такой системы подаётся задающее воздействие $g(t)$, которое попадает в устройство предварительной обработки информации, где формируется сигнал $h(t)$. Из этого сигнала посредством датчика рассогласования вычитается сигнал $z(t)$ и получается разностный сигнал $x(t) = h(t) - z(t)$. Задача следящей системы: минимизировать разностный сигнал, или, что эквивалентно, обеспечить совпадение регулируемой величины $y(t)$ и задающего воздействия $g(t)$. Разностный сигнал поступает в регулятор, который согласно некоторому правилу, называемому законом регулирования, формирует задающее воздействие $u(t)$, изменяющее состояние регулируемого объекта. На объект, кроме того могут действовать и внешние возмущающие воздействия $f(t)$. Системы, в которых $g(t)$ представляет собой постоянную величину называются стабилизирующими.

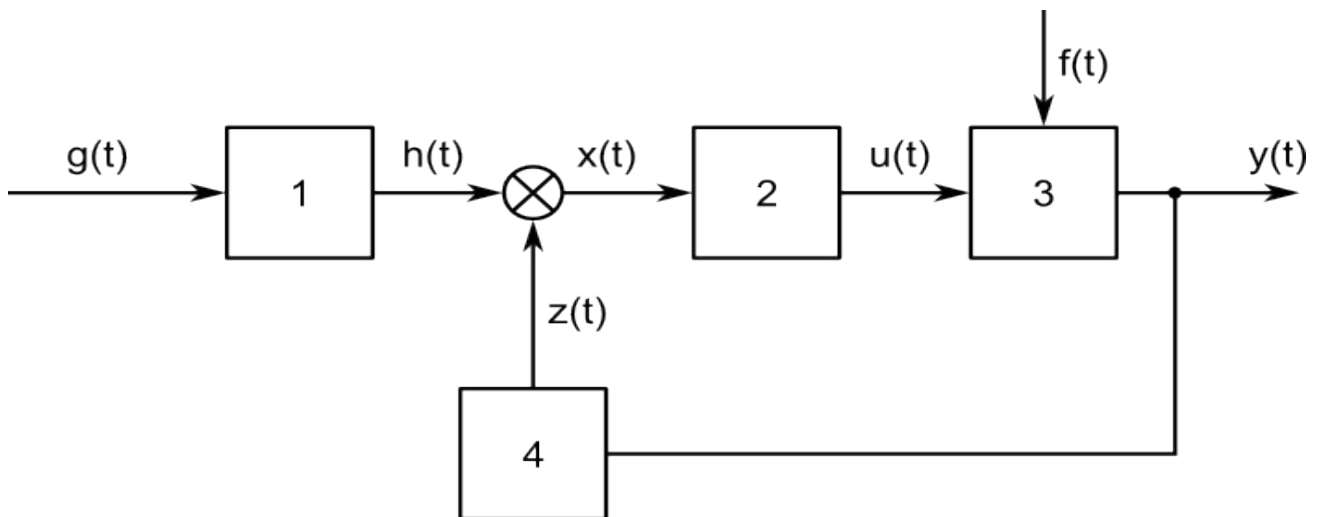


Рис. 2. Общая схема следящих систем 1 – устройство предварительной обработки информации, (×) – датчик рассогласования, 2 – автоматический регулятор, 3 – регулируемый объект, 4 – измерительное устройство и обратная связь.

Для примера, рассмотрим устройство изображённой на рис. 3 термостабилизирующей системы состоящей из электрического нагревателя, датчика температуры и регулирующей части. Подобную систему вам предстоит реализовать в работе.

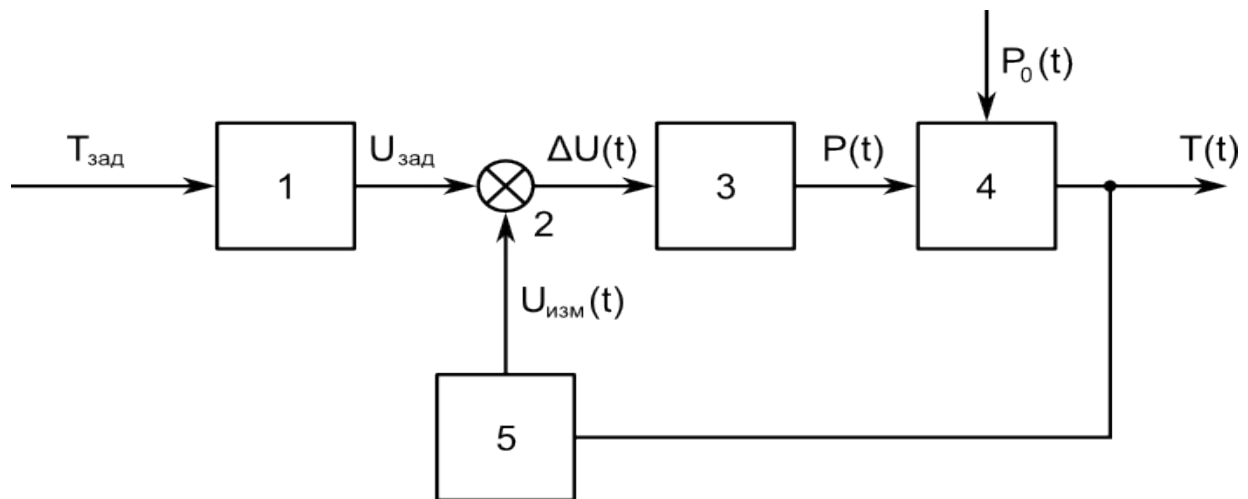


Рис. 3. Схема термостабилизатора. 1 – устройство предварительной обработки информации, 2 – датчик рассогласования, 3 – регулятор, 4 – нагреватель, 5 – датчик температуры.

Температура нагревателя измеряется датчиком температуры, выдающим напряжение $U_{изм}(t)$, при этом естественно $U_{изм}(t)$ есть некая функция от температуры $G(T)$, в общем случае — нелинейная (к примеру для термопары). Заданное значение температуры $T_{зад}$ перед получением разностного сигнала надлежит преобразовать в напряжение следующим образом $U_{зад} = G(T_{зад})$. Датчик рассогласования выдаёт сигнал $\Delta U(t) = U_{зад} - U_{изм}(t)$. Разностный сигнал попадает в регулятор, который при отрицательном значении ($U_{изм} > U_{зад}$) уменьшает мощность нагрева, а при положительном – увеличивает, сводя к нулю разницу $\Delta U(t)$. Возмущающее воздействие $P_0(t)$ представляет собой неконтролируемый внешний отток или приток тепла и может оказывать влияние в случае изменения условий окружающей среды, к примеру при понижении температуры окружающего воздуха или обдуве нагревателя.

В настоящее время всё чаще применяются цифровые системы автоматического регулирования на основе ЭВМ [4]. Структурная схема таких систем представлена на рис. 4. В основе функционирования таких систем лежит оцифровка регулируемой величины для ввода её значения в ЭВМ, последующая реализация регулятора в виде алгоритма, выдающего цифровое значение, пропорциональное регулируемому воздействию. Это значение с помощью ЦАП преобразуется в напряжение, которым управляется исполнительное устройство, воздействующее на объект регулирования.

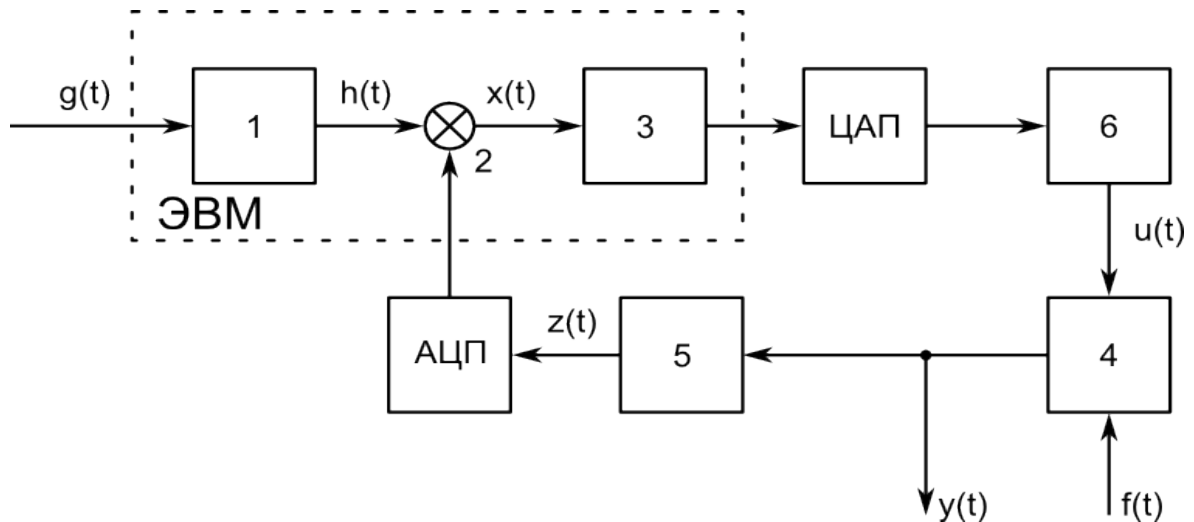


Рис. 4. Схема цифровой системы автоматического регулирования на базе ЭВМ
 1 – устройство предварительной обработки информации, 2 – датчик рассогласования,
 3 – регулятор, 4 – объект регулирования, 5 – датчик, 6 – исполнительное устройство.

Основным преимуществом цифровых систем автоматического регулирования на основе ЭВМ является возможность задавать произвольные, сколь угодно сложные законы регулирования. Такие системы незаменимы в случае большого числа регулируемых параметров. Также существенно упрощается создание самоорганизующихся и самонастраивающихся систем.

1.2. Устойчивость и быстродействие

Под устойчивостью системы регулирования понимают её способность возвращаться в состояние равновесия, после исчезновения внешних сил, которые вывели её из этого состояния. Система называется устойчивой, если из возмущённого состояния она возвращается в некоторую область, окружающую невозмущённое состояние.

Существуют различные формальные критерии (Ляпунова, Найквиста и др.) определения устойчивости линейных систем по виду описывающих их дифференциальных уравнений. Не будем здесь останавливаться на рассмотрении этих критериев, интересующийся читатель может ознакомиться с ними в соответствующей литературе [2,3].

Здесь же рассмотрим связь запаса устойчивости и быстродействия системы с видом переходной характеристики. Под переходной характеристикой понимают вид переходного процесса $y(t)$ (иногда рассматривают разностный сигнал $x(t)$) при подаче типового входного воздействия $g(t)$. В качестве такого воздействия обычно рассматривается функция Хевисайда — единичный скачок $1(t)$, который определяется следующим образом:

$$1(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } t \geq 0 \\ 0, & \text{при } t < 0 \end{cases};$$

График этой функции приведен на рис. 5.

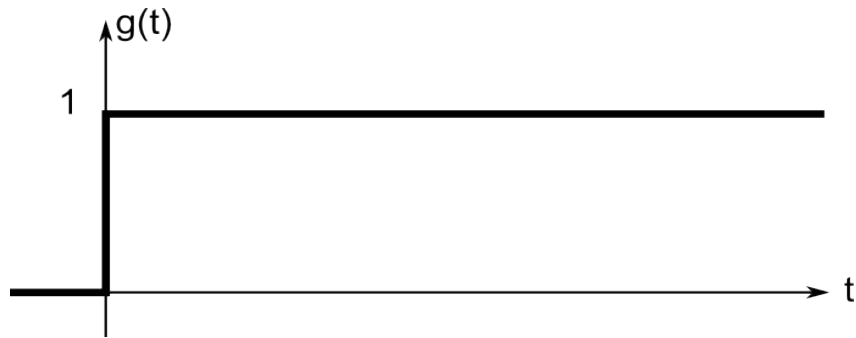


Рис. 5. График функции $1(t)$.

Реакция системы на единичный скачок обычно выглядит следующим образом (см. рис. 6). По этой реакции можно судить о некоторых характеристиках системы управления.

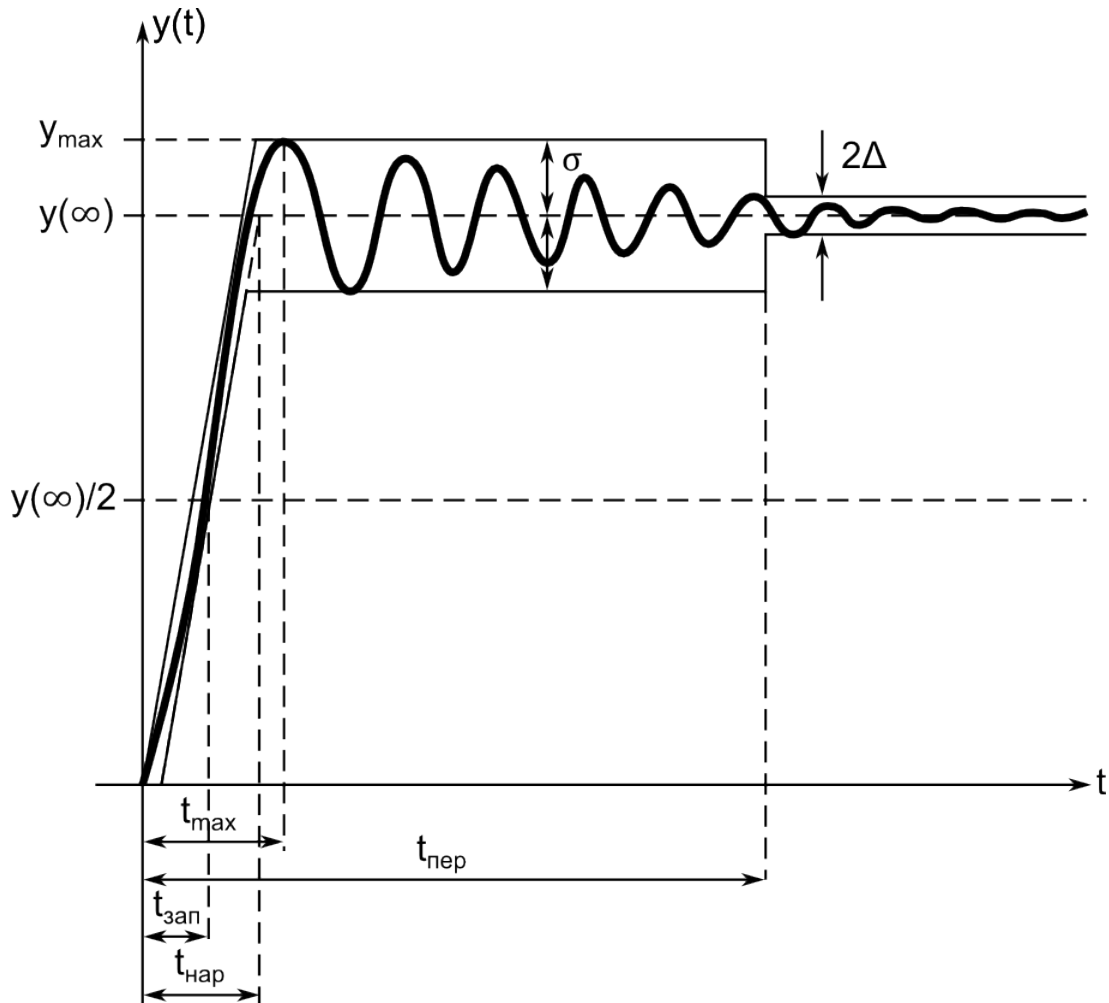


Рис. 6. Реакция системы на единичный скачок.

Запас устойчивости обычно, под которым понимаются пределы в которых система остаётся устойчивой, характеризуется максимальным регулированием y_{max} , либо перерегулированием σ :

$$\sigma = \frac{y_{max} - y_{\infty}}{y_{\infty}} .$$

Допустимое значение перерегулирования определяется из опыта эксплуатации либо из технологических требований. В некоторых случаях может понадобиться полное отсутствие перерегулирования. Быстродействие определяется по длительности переходного процесса t_n , которая, в свою очередь, определяется как время, после которого колебания укладываются в определённый промежуток Δ :

$$|y(t) - y(\infty)| \leq \Delta .$$

Величина Δ называется допустимой ошибкой регулирования, и обычно определяется в процентном соотношении к регулирующему воздействию. Иногда дополнительно задаётся допустимое количество колебаний. Также, вводят такие характеристики как время запаздывания и время нарастания. Их определение легко понять из графика. Время запаздывания $t_{зан}$ — время от начала переходного процесса до достижения уровня 0,5 от установившегося значения $y(\infty)$. Время нарастания $t_{нар}$ — время соответствующее пересечению касательной к $y(t)$ уровня $y(\infty)$.

Как правило, в системах авторегулирования, повышение быстродействия приводит к ухудшению запаса устойчивости, и наоборот, уменьшение колебательности требует увеличения длительности переходного процесса.

1.3. Законы регулирования

Под законом регулирования, в общем случае понимается правило выработки значения $u(t)$:

$$u(t) = F(x, g, f) .$$

Обычно закон регулирования можно разделить по параметрам следующим образом:

$$F = F_1(x) + F_2(g) + F_3(f) .$$

Рассмотрим здесь линейное регулирование только по рассогласованию x (g и f не учитываем). В общем виде линейный закон регулирования можно записать следующим образом:

$$u(t) = kx(t) + k_{инт1} \int x dt + k_{инт2} \iint x dt^2 + k_{инт3} \iiint x dt^3 + \dots \\ + k_{диф1} \frac{dx}{dt} + k_{диф2} \frac{d^2x}{dt^2} + k_{диф3} \frac{d^3x}{dt^3} + \dots .$$

Каждое из слагаемых этой суммы соответствует одному звену регулирования. Звено $u(t)=kx$ называется пропорциональным звеном регулирования. Системы состоящие лишь из пропорционального звена позволяют регулировать различные процессы, однако обычно характеризуются большим перерегулированием и малым запасом устойчивости. Кроме того, идеальное пропорциональное звено на практике реализовать не удаётся, в реальных системах всегда присутствует запаздывание.

Интегральное звено первого порядка описывается следующим образом: $u(t)=k_{инт1} \int x dt$, второго порядка: $u(t)=k_{инт2} \iint x dt^2$, и т. д. Действие интегрального звена основывается на его амплитудно-частотной характеристике: малые частоты оно пропускает, а высокие частоты фильтрует. Таким образом, интегральное звено позволяет учитывать историю поведения разностного сигнала и демпфировать высокочастотные колебания. Следует заметить, что чем выше порядок интегрального звена, тем более устойчивой к колебаниям становится система, но в то же время ухудшается её быстродействие. Нередко интегральное звено обладает не бесконечной, а конечной памятью, в таком случае его можно описать следующим образом:

$$u(t)=k_{инт1} \int x e^{-(t-\xi)/\tau} d\xi, \text{ где } \tau \text{ — характеристическая постоянная времени «запоминания»}.$$

Дифференциальные звенья n-го порядка $u(t)=k_{дифn} \frac{d^n x}{dt^n}$ в установившемся состоянии не оказывают никакого влияния на регулирование, но повышают скорость реагирования и выхода на режим.

Во многих случаях задачу регулирования позволяет решать пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор:

$$u(t)=k x+k_{инт} \int x dt+k_{диф} \frac{d x}{dt}.$$

В дискретном случае со временем между отсчётами ΔT (для реализации регулятора на ЭВМ):

$$u_i=K x+K_{инт} \Delta T \sum_{j=0}^i x_j+K_{диф} \frac{x_i-x_{i-1}}{\Delta T}.$$

Для интегрирующего звена с конечной памятью в N отсчётов: $u_i=K_{инт} \Delta T \sum_{j=i-N}^i x_j$.

Подбор коэффициентов такого регулятора представляет достаточно сложную задачу теоретически, поэтому обычно производится эмпирически.

1.4. Широтно-импульсная модуляция

Достаточно часто в цифровых системах регулирования необходимо при помощи бинарного (вкл/выкл) сигнала приблизить сигнал произвольной формы таким образом, чтобы их мощности совпадали (под мощностью сигнала здесь понимается $p(t) = \int_0^t u(\xi) d\xi$). В таких случаях

применяется широтно-импульсная модуляция (ШИМ, в зарубежной литературе Pulse-Width Modulation – PWM).

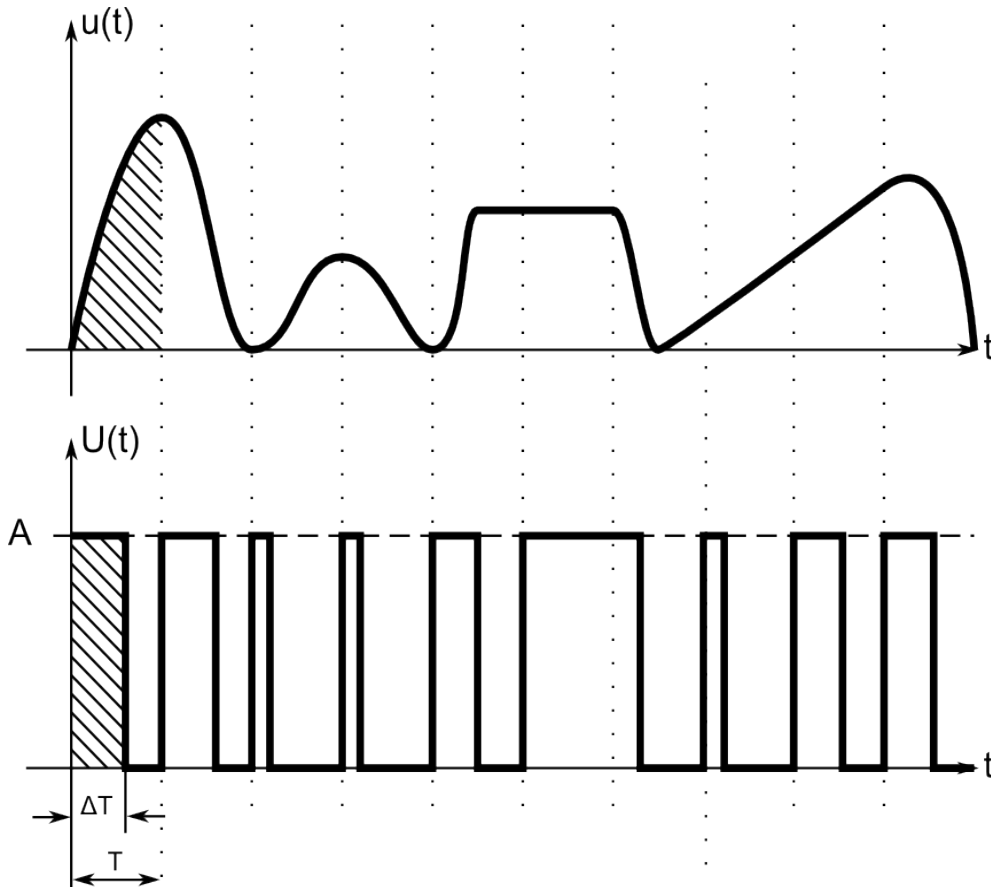


Рис. 7. Широтно-импульсная модуляция.

Сущность метода ШИМ состоит в соответствующем изменении скважности бинарного сигнала (см. рис. 7). Допустим, мы хотим с помощью сигнала $U(t)$ амплитуды A (вкл) или 0 (выкл.) приблизить сигнал $u(t)$. Для этого, выходной сигнал $U(t)$ необходимо разделить на равные промежутки времени длительностью T , и задавать по следующему правилу:

$$U(t) = \begin{cases} A, & \text{при } T_i \leq t \leq T_i + \Delta T \\ 0, & \text{при } T_i + \Delta T < t < T(i+1) \end{cases}$$

где $i=(0,1, \dots)$ – номер соответствующего промежутка. Тогда, если выбрать скважность по

следующему принципу:

$$\Delta T = \frac{\int_{T_i}^{T(i+1)} u(t) dt}{A} ,$$

то мощность на каждом участке, а соответственно и суммарная мощность сигналов $u(t)$ и $U(t)$ будут совпадать. Ошибка будет определяться лишь неточностью задания промежутка ΔT . Значение T выбирается исходя из частоты работы переключателя и должно быть много меньше инерционности управляемой системы. Стоит также отметить, что для корректности приближения всюду должно выполняться условие:

$$\int_{T_i}^{T(i+1)} u(t) dt < AT ,$$

это естественное ограничение мощности сигнала, который можно приблизить сигналом амплитуды A . На практике однако корректность приближения для регулирования не так уж и важна, в большинстве случаев 100% мощность поддерживается до такого уменьшения рассогласования, при котором становится возможной регуляция посредством ШИМ.

1.5. Контрольные вопросы

1. Приведите примеры систем автоматического регулирования. Какие из них можно отнести к стабилизирующим системам, а какие к системам с непостоянным задающим воздействием?
2. Приведите примеры устойчивых и неустойчивых систем. Приведите примеры реальных систем, которые переходят из устойчивого в неустойчивое состояние при изменении входного воздействия.
3. Как выглядят АЧХ интегрирующего и дифференцирующего звена первого порядка? Второго порядка?
4. Какую частоту дискретизации должен иметь ЦАП-ШИМ, чтобы синусоидальный сигнал частотой 10 кГц приблизить не хуже 1%?

2. Описание аппаратуры

На фотографиях (рис. 8, рис. 9) представлен вид экспериментального стенда, с которым вам предстоит работать. Нагревательный элемент (проволочный резистор) расположен на капролоновой термоизолирующей подложке. Поверх нагревателя можно одевать радиатор для отвода тепла или капролоновый термоизолятор. Обе эти детали закрепляются и прижимаются к нагревателю посредством зажима с эксцентриком. Для этого, вставьте деталь таким образом, чтобы пазы попали на выступы подложки, а затем плотно зафиксируйте её с помощью эксцентрика (см. рис. 10). В нагревателе закреплен датчик температуры на металлическом держателе. Внутри нагревателя можно помещать прилагающиеся стержни из различных металлов. Для включения источника питания необходимо нажать кнопку обозначенную надписью «POWER». Не забудьте выключить источник питания по окончании работы. Светодиод «OVERHEAT» сигнализирует о перегреве — превышении температурой нагревателя значения 100 °С, при этом происходит автоматическое отключение нагрева. Светодиод «POWER» показывает подачу питания на модуль.

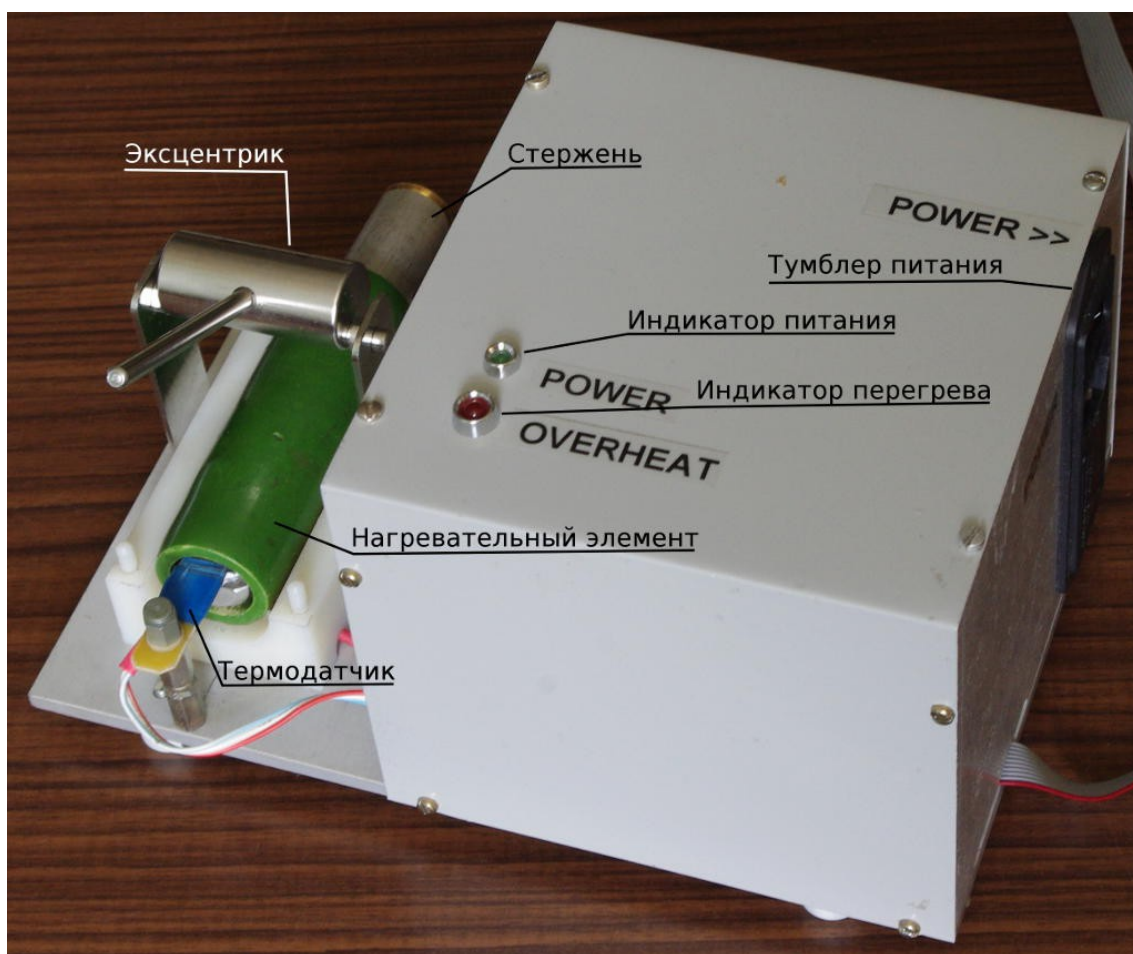


Рис. 8: Фотография экспериментального стенда.



Рис. 9: Элементы установки.

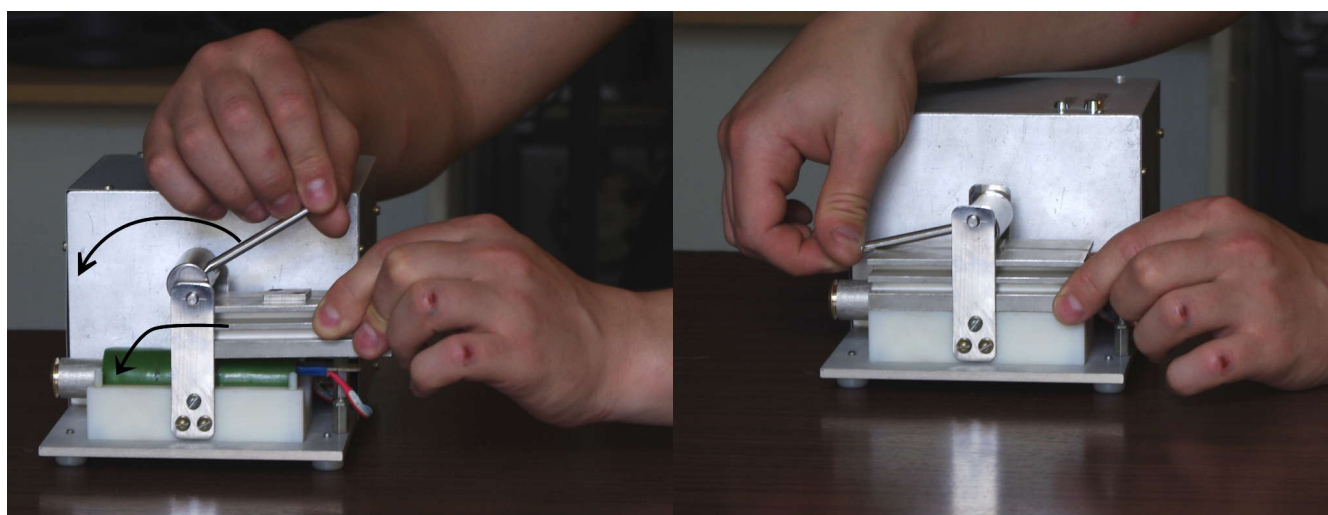


Рис. 10: Фиксация с помощью эксцентрика.

На рис. 11 изображена электрическая схема установки. Нагревателем служит сопротивление R типа ПЭВ номиналом 20 Ом . Ключ размыкает или замыкает цепь, состоящую из источника напряжения $U = 32$ В и нагревателя. Управление ключом осуществляется с помощью сигнала HEAT, высокий уровень которого соответствует замкнутому состоянию ключа, низкий - разомкнутому.

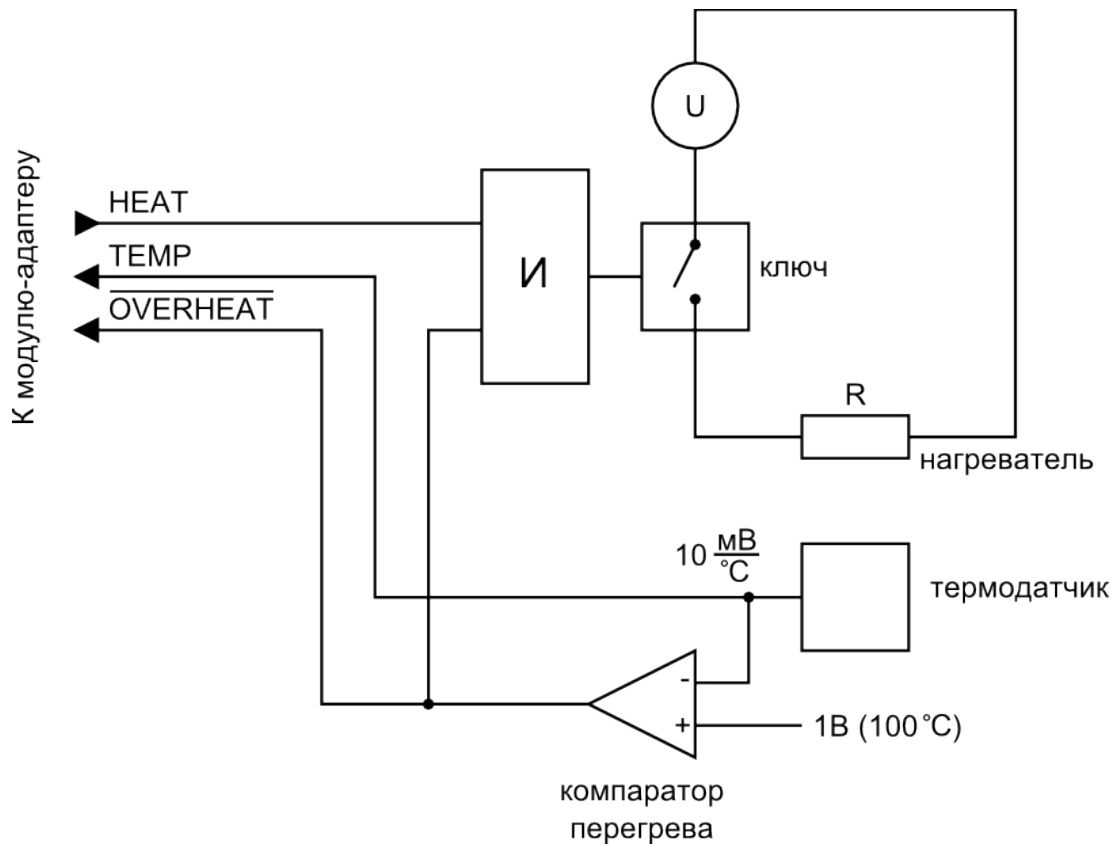


Рис. 11. Электрическая схема установки.

В качестве термодатчика используется LM35, он выдаёт напряжение, пропорциональное температуре с коэффициентом $10 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$. Абсолютная точность измерения - не хуже $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Сигнал с датчика температуры поступает на АЦП NI-PXI6251 по линии TEMP. Кроме того, посредством компаратора этот сигнал сравнивается со значением 1 В ($100 \text{ }^\circ\text{C}$). При превышении температурой значения $100 \text{ }^\circ\text{C}$ на линию $\overline{\text{OVERHEAT}}$ поступает низкий сигнал и схема автоматически отключает нагрев. В нормальном состоянии на линии $\overline{\text{OVERHEAT}}$ сигнал высокий.

Сигналы HEAT, $\overline{\text{OVERHEAT}}$ и TEMP заводятся через модуль-адаптер на плату NI-PXI6251. Соответствие сигналов линиям приведено в следующей таблице:

Таблица 1. Соответствие сигналов линиям NI-PXI6251

Сигнал	Линия NI-PXI6251
TEMP	ai2
HEAT	port1/line7
$\overline{\text{OVERHEAT}}$	port1/line6

3. Задания

1. Напишите функции для управления ключом, считывания показаний термодатчика и контрольных сигналов. Рекомендуется использовать функции со следующей сигнатурой:

```
// Установить состояние ключа. state = 0 - закрыт, state = 1 - открыт
```

```
void set_switch(int state);
```

```
//Считать показания температуры с датчика
```

```
//Возвращает: температуру в градусах
```

```
float read_temp(void);
```

```
//Считать показания сигнала #OVERHEAT
```

```
//Возвращает: 1 - нормальная работа, 0 - перегрев
```

```
int read_noverheat(void);
```

2. Разработайте программу, позволяющую управлять ключом при помощи кнопки, отображающую изменение температуры во времени на графике, а также сигнализирующую о перегреве. Примерный вид окна такой программы изображён на рис. 12.

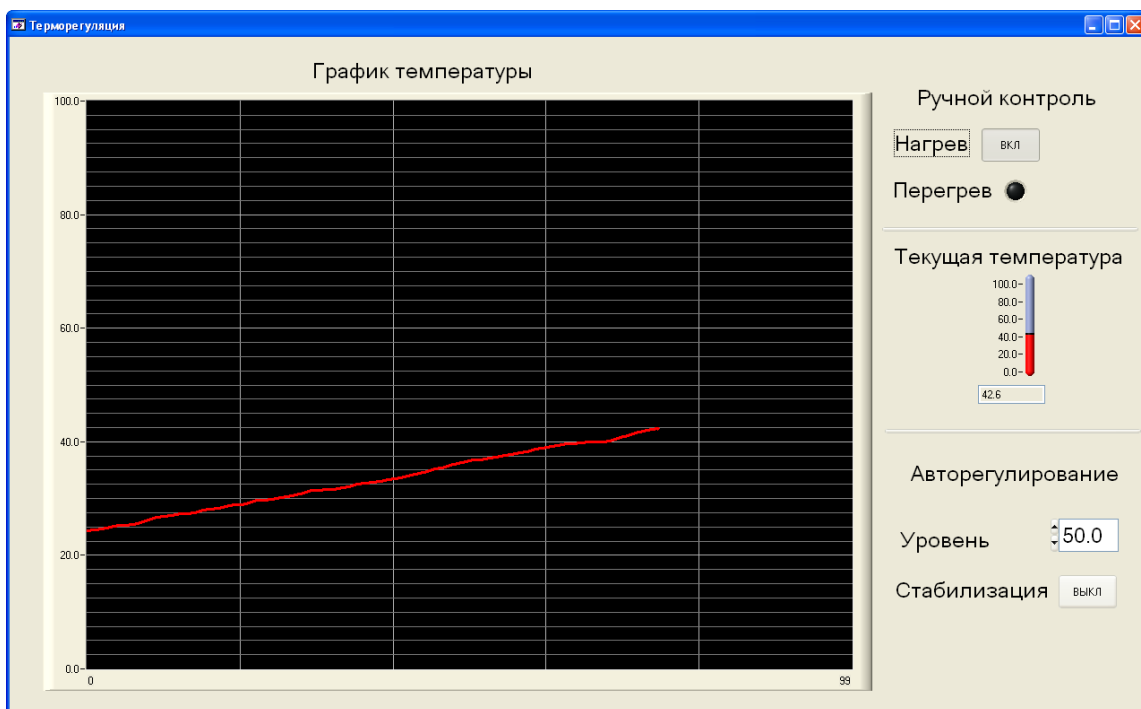


Рис. 12: Примерный вид окна рабочей программы.

3. Пронаблюдайте реакцию температуры на ступеньку полной мощности для следующих случаев:

- Пустой нагреватель с надетым радиатором для отвода тепла.
- Нагреватель со вставленным стержнем и надетым радиатором.
- Пустой нагреватель с надетым термоизолятором.
- Нагреватель со вставленным стержнем и надетым термоизолятором.

4. Усовершенствуйте программу, написанную в предыдущем задании таким образом, чтобы она могла задавать произвольную мощность в нагрузку в процентах с помощью ШИМ. Выберите разумное значение периода T .

5. Напишите программу для автоматического регулирования температуры нагревателя с надетым радиатором. Программа должна удерживать заданную температуру с точностью не хуже $0,1^\circ\text{C}$ и обеспечивать выход на режим за время не более пяти минут. Определите величину перегулирования вашей системы управления.

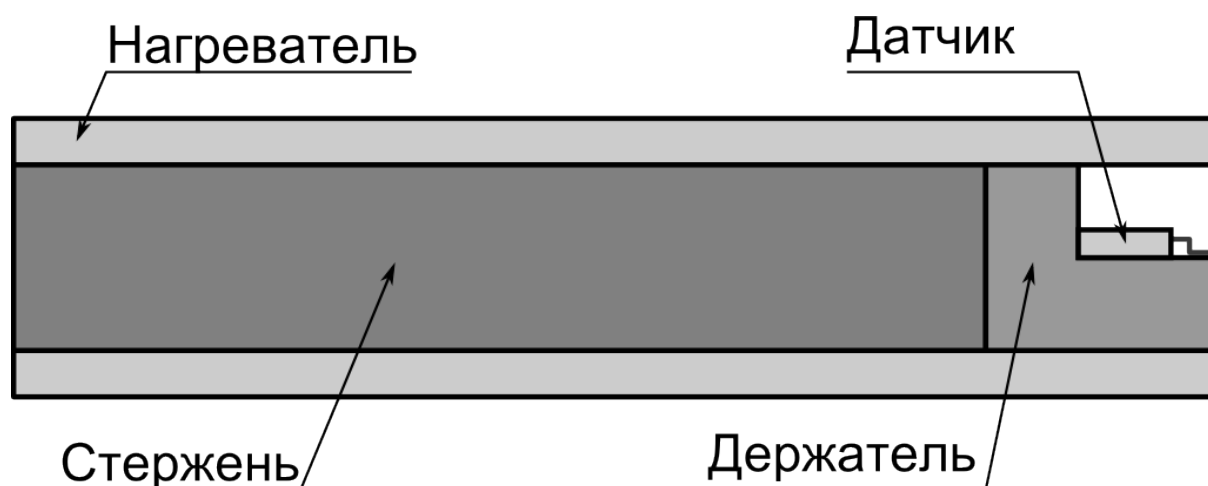


Рис. 13. Схема расположения тел в установке.

6. (*) Напишите программу для оценки теплоёмкости стержня вставленного в нагреватель с надетым термоизолятором. Учтите, что в нагреваемом объёме присутствуют также и другие тела кроме стержня (см. рис. 13). Программа должна работать полностью в автоматическом режиме и выдавать оценку объёмной теплоёмкости C_v в $\text{кДж}/\{\text{Цельсий м}^3\}$. Используя программу и таблицу теплоёмкостей определите материал, из которого изготовлен каждый из трёх цилиндров (сталь СТ-40, дюралюминий Д-16 или латунь ЛС59-1). Объём всех цилиндров одинаковый: $171,5 \text{ см}^3$.

Приложение

Таблица 2: Характеристики материалов стержней

Материал	Удельная теплоёмкость кДж/(К·кг)	Плотность кг/м³
Латунь	0,377	8400
Сталь	0,462	7850
Алюминий	0,930	2790

Список литературы

[1] Otto Mayr The origins of feedback control // MIT Press, Cambridge, Massachusetts and London 1970

[2] В. А. Бесекерский, Е. П. Попов Теория систем автоматического регулирования// Наука, М. 1972

[3] Я. Н. Ройтенберг Автоматическое управление// Наука, М. 1971

[4] Г. Олссон, Дж. Пиани Цифровые системы автоматизации и управления// Невский Диалект, Спб. 2001