АВТОМАТИКА

Лабораторный практикум

для студентов, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия



ЗЕРНОГРАД, 2025

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ – ФИЛИАЛ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» В Г. ЗЕРНОГРАДЕ

Кафедра «Математика и биоинформатика»

К.Н. Лебедев

АВТОМАТИКА

Лабораторный практикум

Зерноград, 2025

© Лебедев К.Н., 2025
© Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2025

Об издании – 1, 2
Содержание

УДК 681.3 – 52(076.5)

Издается по решению методического совета энергетического факультета Азово-Черноморского инженерного института – филиала Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный аграрный университет» в г. Зернограде

Рецензенты:
кандидат технических наук, доцент ***Пономарева Н.Е.***

Лебедев, К.Н. Автоматика [Электронный ресурс]: лабораторный практикум /К.Н. Лебедев. – Электрон. дан. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2025. – 179 с. – Режим доступа: Локальная сеть Библиотеки Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ.

Лабораторный практикум по дисциплине «Автоматика» содержит основные сведения по техническим средствам автоматики, применяемым в сельхозпроизводстве. В пособии приведены техника безопасности при выполнении лабораторных работ, сведения об используемых технических средствах, методики проведения лабораторных работ и вопросы для проверки знаний студентов.

Лабораторный практикум предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия».

Пособие может быть использовано студентами специальностей среднего и высшего образования для изучения дисциплин, связанных с автоматизацией технологических процессов.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры М и БИ.
Протокол № 9 от 22 апреля 2025.

Рассмотрено и одобрено на заседании методического совета энергетического факультета.
Протокол № 4 от 19 мая 2025.

© Лебедев К.Н., 2025
© Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 5
ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ 6
Лабораторная работа № 1 ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ 8
Лабораторная работа № 2 БЕСКОНТАКТНЫЕ ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ 24
Лабораторная работа № 3 ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ 36
Лабораторная работа № 4 ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ 48
Лабораторная работа № 5 ДАТЧИКИ УСИЛИЯ 54
Лабораторная работа № 6 РЕЛЕ АВТОМАТИКИ 72
Лабораторная работа № 7 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ И ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ 87
Лабораторная работа № 8 ЦИФРОВОЙ ПИД-РЕГУЛЯТОР 101
Лабораторная работа № 9 ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ И НАСТРОЙКА РЕЛЕЙНЫХ САР 113
Лабораторная работа № 10 ПРОГРАММНО-ЗАДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА 126
Лабораторная работа № 11 ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ И РАЗРЕЖЕНИЯ 140
Лабораторная работа № 12 НАСТРОЙКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ (ПЧ) АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСА ВОДОСНАБЖЕНИЯ В АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ 158
Лабораторная работа № 13 ИССЛЕДОВАНИЕ ПИ–РЕГУЛЯТОРА ДАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ 165
Литература 179

Введение

Автоматика – это наука об автоматическом управлении техническими системами и процессами без непосредственного участия человека. В сельском хозяйстве автоматизация играет ключевую роль, повышая эффективность производства, снижая затраты ресурсов и улучшая качество продукции.

Автоматизация технологических процессов прошла долгий путь от примитивных ручных операций до сложных интеллектуальных систем. В древности человек полагался исключительно на физический труд и простейшие механизмы, но с развитием науки и техники началась эпоха механизации. Появление паровых машин, электричества и конвейерного производства в XVIII–XIX веках позволило частично заменить человеческий труд машинами, что стало первым шагом к промышленной революции.

В XX веке автоматизация вышла на новый уровень благодаря развитию электроники и вычислительной техники. Появились программируемые контроллеры, системы автоматического регулирования и первые компьютеризированные линии производства. Это позволило не только ускорить процессы, но и повысить их точность и надежность. Автоматика стала неотъемлемой частью промышленности, сельского хозяйства и других сфер, значительно сократив влияние человеческого фактора.

Сегодня автоматизация переживает новый этап, связанный с цифровизацией и искусственным интеллектом. Современные технологии, такие как интернет вещей (IoT), машинное обучение и робототехника, позволяют создавать полностью автономные системы, способные самообучаться и адаптироваться к изменениям. Умные фабрики, точное земледелие и автоматизированные логистические цепочки демонстрируют, что будущее принадлежит интегрированным киберфизическим системам, где человек выступает лишь в роли оператора или стратега. Тем не менее, основой промышленной автоматики являются исполнительные механизмы, датчики и автоматические системы регулирования, изучению которых посвящено данное пособие.

Лабораторный практикум соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту высшего образования бакалавриат по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия» и является частью учебно-методического комплекса дисциплины «Автоматика».

Лабораторный практикум состоит из 13 лабораторных работ и предназначен для практического изучения и исследования датчиков, реле, программных устройств, исполнительных механизмов, позиционных и ПИД–регуляторов, а также получения навыков экспериментального определения динамических характеристик элемент и автоматических систем регулирования. Выполнение каждой лабораторной работы рассчитано на 2 академических часа, выполнение лабораторной работы №13 – на 4 академических часа.

Материальным базисом лабораторного практикума является лабораторная база кафедры, которая формировалась, развивалась и трансформировалась более четырех десятилетий. Лабораторную базу создавали преподаватели, состоящие в разные годы в штате института и работающие в настоящее время: Б.А. Карташов, Ю.И. Деянов, В.В. Коптев, С.Б. Панев, С.А Бузун, К.Н. Лебедев, Ксенз Н.В., Васильев А.Н. и др. В последние годы с учетом современных направлений развития автоматики и требований существующих стандартов к подготовке агроинженеров лабораторная база кафедры обновлена и реконструирована. Методическое обеспечение обновленной лабораторной базы сформировано в результате переработки и дополнения методических указаний и учебных пособий [1-7]. Также в разработке и изготовлении лабораторных стендов принимали участие студенты кафедры [8-11].

Требования к выполнению работ:

1. Перед выполнением лабораторной работы необходимо изучить теоретический материал.
2. Строго соблюдать технику безопасности при работе с электрооборудованием.
3. Результаты экспериментов фиксировать в отчетах, анализировать и делать выводы.
4. Отчет по каждой работе должен содержать:
   - цель и задачи;
   - схему эксперимента;
   - полученные данные;
   - анализ результатов;
   - выводы.

Таким образом, лабораторный практикум позволяет на практике освоить принципы автоматизации, необходимые для современного сельскохозяйственного производства. Полученные навыки помогут будущим инженерам эффективно внедрять автоматизированные системы, повышая производительность и снижая затраты в АПК.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Во избежание возможных несчастных случаев при выполнении лабораторных работ необходимо соблюдать следующие правила техники безопасности:

1. Изучить содержание настоящей инструкции и расписаться в журнале проверки знаний правил техники безопасности.

2. Включать электрическую схему под напряжение только в присутствии преподавателя.

3. Отключать схему от сети в случае перерыва в работе.

4. Вносить изменения в электрическую схему только после отключения ее от сети.

5. Во время выполнения работы категорически запрещается:

- касаться токоведущих частей схемы и установки;
- производить переключения в рабочей схеме, находящейся под напряжением;
- включать действующую схему после каких-либо изменений в ней до проверки преподавателем;
- оставлять схему, находящуюся под напряжением, без надзора.

6. Ставить в известность преподавателя о неисправном состоянии проводов, измерительных приборов и электрооборудования, не делая попыток к их исправлению.

7. В случае поражения электрическим током немедленно обесточить рабочее место для освобождения пострадавшего от действия электрического тока, немедленно поставить в известность преподавателя или лаборанта о случившемся и вместе с ним приступить к оказанию первой помощи пострадавшему до прибытия на место происшествия вызванного врача.

8. По окончании работы обесточить и разобрать схему, а соединительные провода поместить в отведенное для них место.

Лабораторная работа № 1
ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

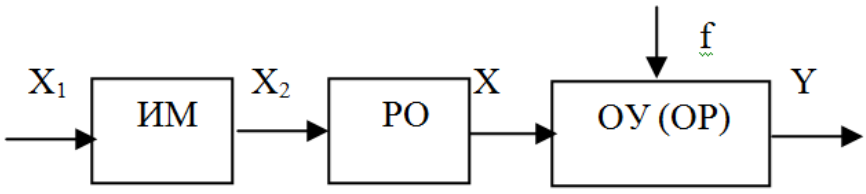
1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с принципами работы, назначением и областью применения исполнительных механизмов автоматики и подробно изучить электрические исполнительные механизмы.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Общие сведения об исполнительных механизмах

Исполнительный механизм является одним из основных элементов в системах автоматизации производственных процессов. Исполнительными механизмами называются устройства автоматики, воздействующие непосредственно или через согласующие элементы на регулирующие органы объектов управления (объектов регулирования). Они как часть САУ (САР) предназначены для изменения управляющего (регулирующего) воздействия на объекте управления (регулирования) в соответствии с сигналом, формируемым управляющим устройством (регулятором) таким образом, чтобы компенсировать отклонение управляемой (регулируемой) величины от заданного значения, вызванного изменением возмущающего воздействия *f* (рисунок_1). Исполнительные механизмы также используются в системах дистанционного управления. В таких системах сигнал X_1 формируется и подается на вход исполнительного механизма по каналу связи оператором или автоматически, например, посредством программного устройства.



ОУ (ОР) – объект управления (регулирования); РО – регулирующий орган; ИМ – исполнительный механизм; У – управляемая (регулируемая) величина; Х – управляющее (регулирующее) воздействие; f – возмущающее воздействие; X_1 – входной сигнал ИМ, сформированный в управляющем устройстве (регуляторе); X_2 – входной сигнал РО

Рисунок 1 – Фрагмент функциональной схемы САУ (САР)

Исполнительные механизмы и регулирующие органы, чаще всего, конструктивно выполняют в виде единого технического устройства. В таких случаях его называют просто исполнительным механизмом, не отражая в названии наличие регулирующего органа.

В общем случае любой исполнительный механизм состоит из элемента силового воздействия и элементов его сопряжения с регулирующим органом (различных кинематических звеньев для преобразования угловых перемещений в линейные или наоборот, получения определенных скоростей и т.п.).

В зависимости от вида энергии, потребляемой силовым элементом, исполнительные механизмы подразделяются на пневматические, гидравлические и электрические. Из перечисленных типов исполнительных механизмов в автоматических системах сельскохозяйственного назначения преимущественно применяются электрические исполнительные механизмы. В связи с этим мы ограничимся рассмотрением только электрических исполнительных механизмов. Электрические исполнительные механизмы классифицируются на *электродвигательные* и *электромагнитные*. Последние в свою очередь делятся на так называемые соленоидные – с ходовыми электромагнитами поступательного перемещения и электромагнитные муфты. Соленоидные исполнительные механизмы (с электромагнитами принято называть электромагнитными исполнительными механизмами.

2.2 Электродвигательные исполнительные механизмы

Электродвигательные исполнительные механизмы обычно состоят из двигателя, редуктора и тормоза (последнего может и не быть). Двигатель в исполнительных механизмах выполняет функции силового элемента, создающего так называемые перестановочные усилия или моменты, необходимые для перемещения рабочего органа. Редуктор предназначается для преобразования угловых перемещений вала двигателя в линейные перемещения рабочего органа с определенной скоростью (для рабочих органов с поступательным перемещением) или для обеспечения требуемых угловых скоростей рабочего органа (для рабочих органов вращательного движения). Тормоз в исполнительных механизмах служит для предотвращения или снижения его выбега после отключения электродвигателя от сети. При включении исполнительного механизма напряжение (сигнал) управления поступает одновременно к двигателю и тормозу, механизм растормаживается и двигатель приводит в движение рабочий орган. При исчезновении сигнала двигатель выключается, а тормоз останавливает механизм. Простота схемы, малое число элементов, участвующих в формировании управляющего (регулирующего) воздействия и высокие эксплуатационные свойства сделали исполнительные механизмы с управляемыми двигателями основой для создания исполнительных устройств современных САУ (САР).

Существуют, хотя и не получили широкого распространения, исполнительные механизмы с неуправляемыми двигателями, которые содержат управляемую электрическую муфту. Характерная их особенность заключается в том, что двигатель работает непрерывно в течение всего времени работы системы регулирования, а сигнал управления передается рабочему органу через управляемую муфту при появлении сигнала рассогласования в автома-

тических системах или по команде оператора в системах дистанционного управления.

В зависимости от модификации исполнительных механизмов в них используются двухфазные конденсаторные электродвигатели с полым ротором, обладающие хорошими динамическими качествами и допускающие длительную работу в застопоренном режиме при полном напряжении питания, а при мощности свыше 500 Вт – трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором.

Мощность установленного на исполнительном механизме электродвигателя и передаточное отношение редуктора определяют его основные показатели: максимальный вращающий момент, номинальный момент на валу, время одного оборота выходного вала, сведения о которых можно получить из справочной литературы, где также приводится и другая информация, позволяющая производить выбор исполнительных механизмов для конкретных условий.

На рисунке 2, в качестве примера, приведена кинематическая схема исполнительного механизма типа ПР-М (МЭО-6,3/10) с установкой его на двухседельном регулирующем клапане. Он имеет асинхронный двухфазный электродвигатель 1, шестеренный редуктор 2 для передачи крутящего момента от электродвигателя 1 на диск входного устройства 3, или шестерню 4, обеспечивающую возвратно-поступательное движение рейки 5 и сочлененного с ней штока 6 клапанов 7.

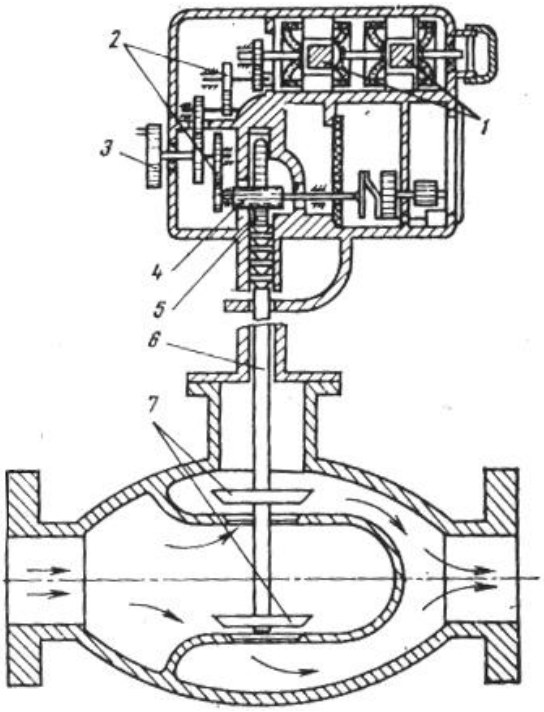
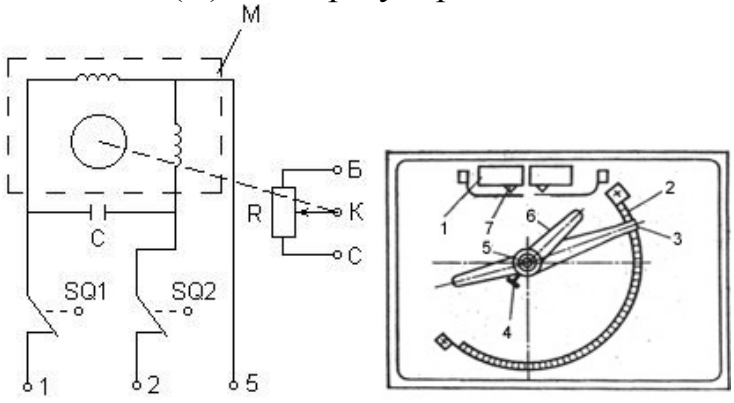


Рисунок 2 – Кинематическая схема электродвигательного исполнительного механизма

Электрическая схема исполнительного механизма показана на рисунке 3 *а*. Включение двигателя обеспечивается посредством подачи напряжения к

точкам 1,5 или 2,5. При этом в первом случае двигатель будет вращаться в одном направлении, а во втором – в обратном. Отключение исполнительного механизма в крайних положениях «вправо» или «влево» осуществляется контактами конечных выключателей (рисунок 3 *б*) установленных в его корпусе. Конечные выключатели срабатывают при нажатии на них одного из кулачков 6, поворачивающихся вместе с выходным валом 5 исполнительного механизма. При отходе кулачка 6 от выключателя 1 подвижный контакт 7 возвращается в исходное положение. Для предотвращения поломки конечных выключателей 1 кулачек 6 воздействует на контакты выключателей через гибкие пластины 8. Величина углов поворота вала исполнительного механизма, при которых срабатывают конечные выключатели 1, регулируется вручную поворотом кулачков 6 на оси вала. Каждый кулачок 6 закрепляется винтом 4. Ползунок (скользящий контакт) 3 датчика обратной связи 2 соединен с выходным валом исполнительного механизма, а сам датчик неподвижно закреплен на корпусе исполнительного механизма.

Исполнительный механизм ПР-1М в САР может применяться без использования датчика обратной связи или с его включением в схему управления исполнительного механизма. В первом случае он будет астатическим (интегрирующим) звеном САР, реализующей при этом пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования. Во втором случае исполнительный механизм является статическим (апериодическим) звеном САР, обеспечивающей пропорциональный (П) закон регулирования.



а) *б)*

Рисунок 3 – Электрическая схема исполнительного механизма МЭО-6,3/10 (ПР-М, ПР-1М) (*а*) и кинематическая схема узла потенциометрического датчика обратной связи (*б*); М – двухфазный асинхронный двигатель с полым ротором; SQ1 и SQ2 – контакты концевых выключателей (микропереключателей) 1; R – потенциометрический датчик (реостат) обратной связи 2; скользящий контакт датчика 3; С – фазовращающий конденсатор

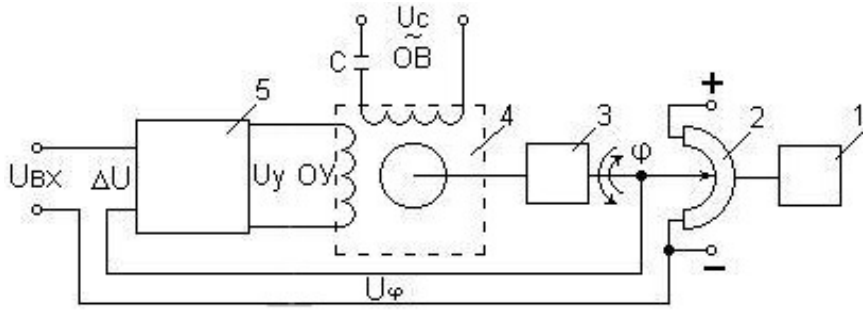
Сервопривод (следящий привод) – привод с управлением через отрицательную обратную связь, позволяющую точно управлять параметрами движения. Сервоприводом является любой тип механического привода (устройства, рабочего органа), имеющий в составе датчик (положения, скорости,

усилия и т.п.) и блок управления приводом (электронную схему или механическую систему тяг), автоматически поддерживающий необходимые параметры на датчике (и, соответственно, на устройстве) согласно заданному внешнему значению (положению ручки управления или численному значению от других систем).

Проще говоря, сервопривод является «автоматическим точным исполнителем» – получая на вход значение управляющего параметра (в режиме реального времени), он, основываясь на показаниях датчика, стремится создать и поддерживать это значение на выходе исполнительного элемента.

К сервоприводам, как к категории приводов, относится множество различных регуляторов и усилителей с отрицательной обратной связью, например, гидро-, электро-, пневмоусилители ручного привода управляющих элементов (в частности, рулевое управление и тормозная система на тракторах и автомобилях), однако, термин «сервопривод», чаще всего, используется для обозначения электрического привода с обратной связью по положению, применяемому в автоматических системах для привода управляющих элементов и рабочих органов.

На рисунке 4 показана схема включения исполнительного механизма с использованием отрицательной обратной связи по угловому перемещению φ его выходного вала.



1 – рабочий орган; 2 – датчик обратной связи; 3 – редуктор;
4 – электродвигатель; 5 – усилитель; ОВ – обмотка возбуждения;
ОУ – обмотка управления

Рисунок 4 – Схема управления исполнительным механизмом
с использованием датчика обратной связи

В качестве усилителя в данной схеме следует использовать низкочастотный усилитель, обеспечивающий изменение напряжения управления U_y по фазе и амплитуде в зависимости от величины и знака сигнала рассогласования $\Delta U = U_{вх} - U_{\varphi}$. При положительном значении ΔU фаза напряжения U_y должна быть одинаковой с фазой напряжения сети Uc, питающего обмотку возбуждения, а при отрицательном значении ΔU – противоположной (отличается на 180^0). Таким образом обеспечивается вращение двигателя в разных направлениях (при одной фазе напряжения U_y двигатель вращается «влево», а при обратной – «вправо»). При этом угловая скорость электродвигателя должна однозначно зависеть от абсолютного значения сигнала рассогласования ΔU. То есть усилитель должен выполнять функции фазовращателя и

модулятора переменного напряжения частотой 50 Гц под воздействием медленно изменяющегося напряжения рассогласования ΔU. Для этих целей могут быть использованы электронные модуляторы на диодах или транзисторах.

Эквивалентная передаточная функция исполнительного механизма в соответствии с его структурной схемой (рисунок 5).

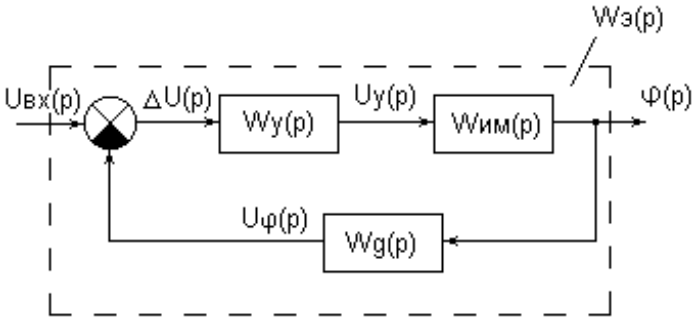
$$W_э(P) = \frac{\varphi(p)}{U_{вх}(p)} = \frac{W_{им}(p)\,W_у(p)}{1 + W_{им}(p)\,W_у(p)\,W_\theta(p)},$$

где $W_{им}(p) = \frac{\varphi(p)}{U_у(p)} = \frac{k_{им}}{p}$;

$$W_у(p) = \frac{U_у(p)}{\Delta U(p)} = k_у;$$

$$W_Д(p) = \frac{U_\varphi(p)}{U_у(p)} = k_Д$$

где $k_{им}$, $k_у$, $k_д$ – передаточные коэффициенты соответственно исполнительного механизма, усилителя и датчика;
φ(p), $U_{вх}(p)$, $U_у(p)$, $U_\varphi(p)$, ΔU(p) – изображения по Лапласу соответственно φ, $U_{вх}$, $U_у$, U_φ, ΔU.



$W_{им}(p)$, $W_Д(p)$, $W_у(p)$ – передаточные функции соответственно исполнительного механизма, потенциометрического датчика и усилителя;
$W_э(p)$ – эквивалентная передаточная функция

Рисунок 5 – Структурная схема исполнительного механизма, охваченного отрицательной обратной связью

После подстановки в исходное выражение $W_э(p)$ передаточных функций отдельных звеньев (рисунок 5) и несложных алгебраических преобразований она примет окончательный вид:

$$W_э(p) = \frac{\varphi(p)}{U_{вх}(p)} = \frac{k_э}{T_э p+1},$$

где $k_э$, $T_э$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени, определяемые так:

$$k_э = \frac{1}{k_д}; \qquad T_э = \frac{1}{k_{им} k_у k_д}.$$

Из последней передаточной функции следует, что для повышения быстродействия исполнительного механизма (снижения величины постоянной времени $T_э$) необходимо увеличить коэффициент усиления усилителя k_y.

При использовании исполнительного механизма в системах дистанционного управления потенциометрический датчик (реостат) может быть использован для подключения прибора – указателя положения регулирующего органа, например вольтметра со шкалой, проградуированной в единицах, отображающих величину перемещения рабочего органа. Управление исполнительным механизмом в системах дистанционного управления может обеспечиваться с помощью контактных или бесконтактных коммутационных элементов (реле, магнитных пускателей, полупроводниковых устройств).

Разновидностью электродвигательных исполнительных механизмов является *актуатор* – законченное универсальное исполнительное устройство, управляемое с помощью устройства управления. Для использования актуатора не требуются дополнительные ременные или цепные приводы, которые требуют дополнительных компонентов (линейных подшипников, рельсов и кареток) для создания законченного устройства. Линейные актуаторы состоят из привода и направляющей (рисунок 6).



Рисунок 6 – Линейные актуаторы

В качестве механического привода используется устройство, обеспечивающее перемещение: шариковинтовая передача, передача винт-гайка, ременный привод, реечная передача. В качестве направляющей используется конструкция из одной или нескольких телескопических труб, профильные рельсовые направляющие и различные линейные направляющие скольжения или качения, по которым осуществляется движение. Актуатор позволяет осуществлять линейное перемещение (линейный актуатор, линейный привод) или вращение (актуатор вращения, привод вращения, рисунок 7) исполнительного устройства – штока, каретки, поворотного стола, заслонки. При

этом в конструкции актуатора может быть предусмотрено преобразование одного типа движения в другое, например, вращения электродвигателя в поступательное при помощи червячного редуктора и передачи гайка-винт, так и работа без преобразования типов движения – в соленоидах, линейных двигателях.



Рисунок 7 – Радиальный актуатор

Необходимость осуществления прямолинейного движения в многочисленных промышленных, научных, медицинских, бытовых, военных и других устройствах привела в конечном счете к определенной универсальности этих самых устройств – актуаторов. Наиболее важными характеристиками актуаторов с точки зрения их универсальности являются усилие, скорость перемещения и рабочий ход. Довольно важной характеристикой является рабочий цикл (коэффициент загрузки) – процент времени, которое актуатор может функционировать без необходимости остановки. Рабочий цикл редко бывает равен 100%. Требование стопроцентного рабочего цикла актуатора приводит к его значительному удорожанию. Для разных условий применения важны и другие характеристики – диапазон рабочих температур, напряжение питания и т.д.

К числу электродвигательных исполнительных механизмов могут быть отнесены те, в которых используются *шаговые двигатели*. Шаговые двигатели (ШД) представляют собой многофазные и многополюсные синхронные электрические машины, у которых питание обмоток статора осуществляется импульсным напряжением поочерёдно, с помощью электронного коммутатора. После каждого импульса ротор двигателя поворачивается на определённый угол, называемый шагом. Шаговые двигатели целесообразно применять в тех случаях, когда требуется осуществить прерывистое (стартстопное) движение, а также непрерывное движение, если управляющий сигнал задан в виде серии последовательных импульсов (унитарного кода).

В устройствах автоматики наибольшее применение нашли ШД с числом фаз $m \geq 3$, обмотки которых возбуждаются поочередно или группами импульсами напряжения прямоугольной формы. На рисунке 8 изображена схема ШД с числом фаз $m = 6$. Если подавать поочередно импульсы напряжения на фазные обмотки 1–2–3–4–5–6, то ротор двигателя будет скачком поворачиваться в положение, при котором его ось совпадает с осью фазной обмотки, находящейся под напряжением, т.е., соответственно, 1–2–3–4–5–6.

Таким образом, ротор будет иметь шесть устойчивых положений, со-

ответствующих направлению вектора намагничивающей силы F фазной обмотки, включённой в данный момент времени. Шаг двигателя будет при этом равен $\Delta\alpha = 360°/m = 360°/6 = 60°$.

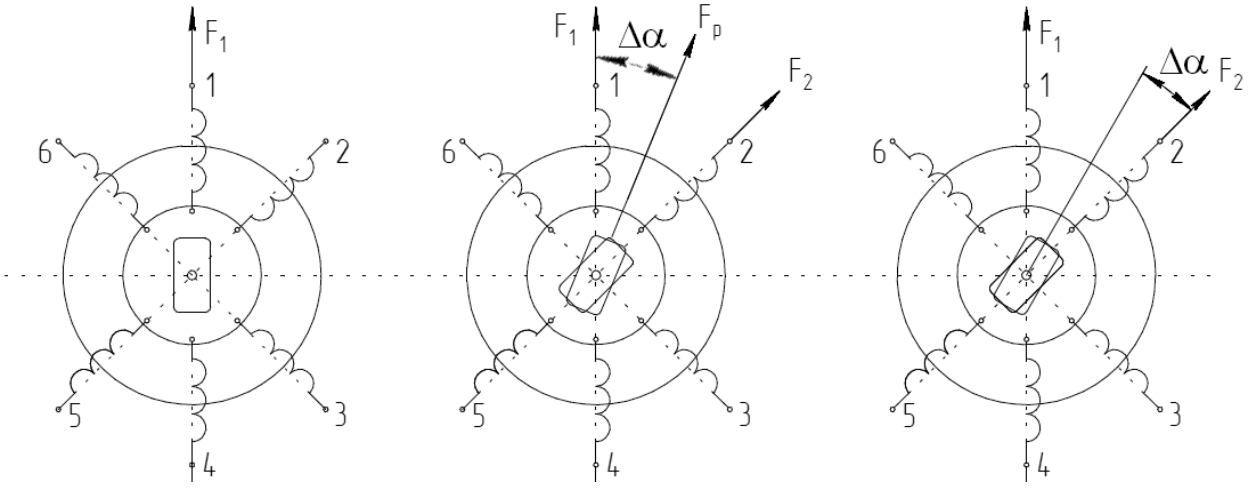


Рисунок 8 – Схема обмоток шагового двигателя

Можно применить и более сложную схему коммутации фазных обмоток, т.е. подавать напряжение одновременно на несколько фазных обмоток. Так, если одновременно подать напряжения на фазы 1 и 2, то ротор повернётся на угол $\Delta\alpha = 360°/(2m) = 360°/12 = 30°$. Он установится по оси результирующего вектора намагничивающей силы $F_р$, равного геометрической сумме векторов F_1 и F_2. При шаге 30° порядок коммутации фазных обмоток рассматриваемого двигателя может быть различным: вариант А – (1) – (1,2) – (2) – (2,3) – (3) ... ; вариант В – (1,2) – (1,2,3) – (2,3) – (2,3,4).

По конструкции ШД делятся: на магнитоэлектрические, реактивные и индукторные. У магнитоэлектрических ШД ротор выполняется в виде постоянного магнита с одной или несколькими парами полюсов. Статор имеет явно выраженные полюсы, на которые наматываются фазные обмотки.

У реактивного ШД ротор выполняется из магнитомягкого материала, а статор имеет m-фазную сосредоточенную обмотку. При малом шаге (1–5°) используют реактивный редукторный ШД с гребенчатыми выступами на статоре. Индукторные ШД по конструкции и принципу работы сходны с редукторными двигателями.

Управление ШД основано на изменении частоты, числа и порядка подачи импульсов постоянного напряжения в фазные обмотки. Изменением частоты импульсов регулируют частоту вращения ШД. Поворот выходного вала ШД на заданный угол осуществляется подачей определённого числа импульсов. Перемена направления вращения выходного вала ШД осуществляется изменением порядка подачи импульсов на фазные обмотки от электронного коммутатора. В отличие от сервоприводов, шаговые приводы позволяют получать точное позиционирование без использования обратной связи от датчиков углового положения.

Шаговые двигатели имеют следующие особенности:

– Положение ротора ШД в статическом режиме устойчивое, т.к. существует синхронизирующий момент, фиксирующий положение ротора по отношению к статору. У двигателей постоянного и переменного тока такого момента нет.
– Шаговые двигатели может обеспечить широкий диапазон регулирования частоты вращения от максимального до нуля.
– Движение ротора ШД дискретное с шагом от 0,9° до 36° в зависимости от типа ШД и выбранного числа тактов коммутации фазных обмоток.
– Скорость изменения частоты управляющих импульсов не должна быть больше определённого для каждого типа ШД значения, называемого частотой приёмистости. Частота приёмистости для серийно выпускаемых ШД может быть в диапазоне от 100 Гц до 2500 Гц.

2.3 Электромагнитные исполнительные механизмы

Электромагнитные исполнительные механизмы (рисунок 9) состоят из ходового электромагнита, сочлененного с рабочим органом и обеспечивающим его перемещение в направлении движения подвижного сердечника. Перемещение рабочего органа в обратном направлении обеспечивается посредством пружины.

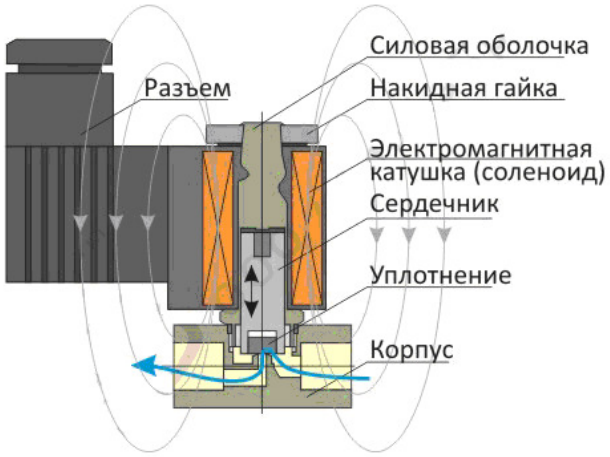
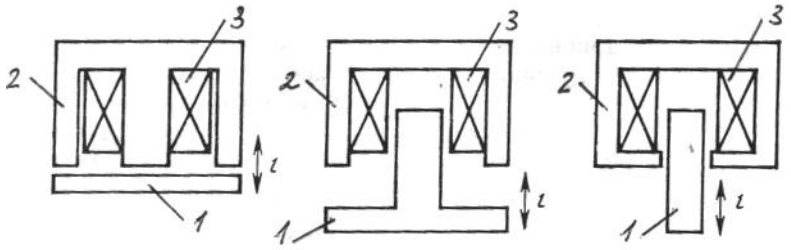


Рисунок 9 – Электромагнитный исполнительный механизм

Ходовые электромагниты, используемые в исполнительных механизмах, могут быть переменного (однофазные и трехфазные) и постоянного тока. В зависимости от хода якоря (его максимального перемещения) различают короткоходовые (рисунок 10 *а*) и длинноходовые (рисунок 10 *б, в*) электромагниты.

Электромагнитные исполнительные механизмы по сравнению с электродвигательными обладают меньшей мощностью, но при этом отличаются простотой конструкции, несложными схемами управления, небольшими размерами и массой, значительно меньшей стоимостью и высокой надежностью. Характерная особенность электромагнитных механизмов заключается в том,

что они могут быть применены только в двухпозиционных системах управления, то есть когда регулирующий орган может находиться только в двух конечных положениях («открыто» или «закрыто»). Так как электромагнитный механизм может находиться в любом из двух устойчивых положений продолжительное время, то неизбежно длительное потребление электроэнергии при включенном состоянии соленоида. Этого недостатка лишены электромагнитные механизмы особой конструкции.



а) *б)* *в)*

а – короткоходовой; *б, в* – длинноходовые; 1 – якорь (сердечник); 2 – ярмо; 3 – обмотка; l – перемещение якоря (сердечника)

Рисунок 10 – Типы электромагнитов

Известно, что тяговое усилие электромагнита пропорционально квадрату намагничивающей силы, а следовательно, и квадрату тока, протекающего по обмотке. Поэтому они могут работать как на постоянном, так и переменном токе, что и предопределило два типа электромагнитных исполнительных механизмов (постоянного и переменного тока). Однако электромагниты переменного тока имеют несколько худшие параметры, чем электромагниты постоянного тока, поскольку при одинаковых размерах развивают меньшее тяговое усилие, обладают меньшей чувствительностью и дороже из-за необходимости иметь шихтованный магнитопровод. Вместе с этим по причине преимущественного распространения переменного тока, исполнительные механизмы с электромагнитами переменного тока нашли широкое применение в системах автоматики.

Время срабатывания электромагнитного исполнительного механизма может быть получено значительно меньшим, чем для электродвигатльного исполнительного механизма, и во многих случаях их применения этот момент играет решающую роль. Однако они могут быть использованы только при ограниченных перемещениях ведомого звена. Существенным недостатком этих механизмов является то, что в конце хода якоря происходит удар. Во избежание этого в ряде случаев приходится предусматривать включение тормозных устройств – гидравлических или пневматических, ограничивающих величину скорости якоря в конце хода, либо заменять их устройствами другого типа

На рисунке 11 в качестве примера приведена схема включения исполнительного механизма установленного на вентиле, содержащем главный тяговый электромагнит $У_1$, электромагнит $У_2$ защелки и блок-контакты SQ.

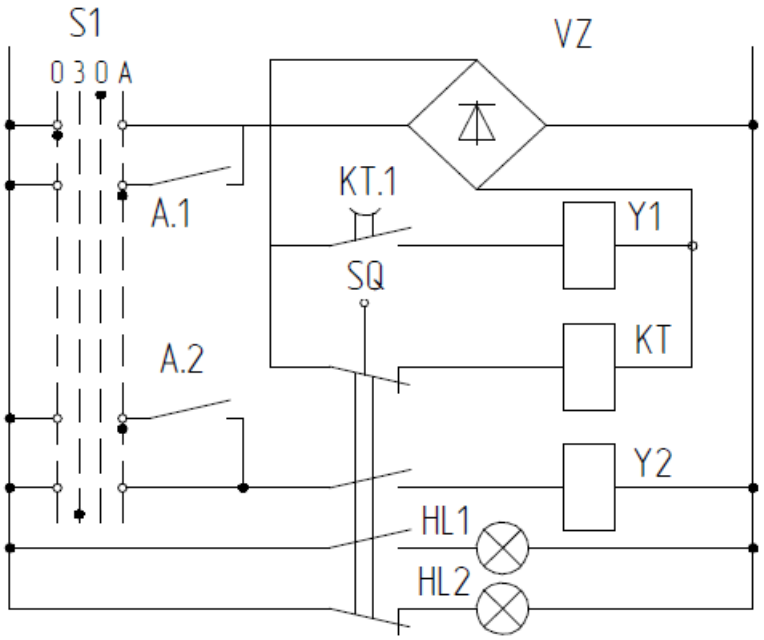


Рисунок 11 – Принципиальная схема включения электромагнитного исполнительного механизма

В этой схеме главный электромагнит Y1 и реле выдержки времени КТ получают питание от сети переменного тока через выпрямительный мост VZ. Реле выдержки времени КТ предназначено для надежного включения электромагнита Y1. Дело в том, что блок-контакты SQ размыкаются за 3–4 мм до окончания полного хода якоря электромагнита Y1, и он достигает своего конечного положения по инерции. В том случае, когда управляемая среда оказывает большое сопротивление движению рабочего органа, снимать напряжение с катушки Y1 блок-контактами SQ нельзя, так как инерция движущихся частей оказывается недостаточной для постановки якоря электромагнита на защелку. При этом якорь под действием пружины возвращается в исходное состояние и снова включается. Таким образом, начинается процесс многократной попытки автоматического его включения. При наличии реле времени КТ напряжение с катушки Y1 снимается контактами КТ1 после остановки главного электромагнита на защелку вследствие размыкания блок-контактов SQ в цепи реле КТ.

Дистанционно исполнительный механизм управляется при помощи ключа управления S1, поворачивая его в положение 0 – «открыто» или 3 – «закрыто». Положению А ключа S1 соответствует «автоматическое управление». Когда от двухпозиционного регулятора поступает сигнал «больше», замыкаются контакты А1, срабатывает электромагнитная защелка, и вентиль закрывается. Если же получен сигнал «меньше», замыкаются контакты А2, включается вначале реле КТ, а затем – главный электромагнит Y1, который открывает вентиль. Лампы HL1 и HL2 сигнализируют соответственно об открытом и закрытом положении вентиля.

2.4. Электромагнитные муфты

Во многих электрических системах управления исполнительный элемент системы – электрический двигатель соединяется с регулирующим органом производственного механизма через специальное соединительное устройство, которое называют *муфтой*. Муфта служит для передачи механической энергии с одного вала на другой. Существует большое количество конструкций муфт, основанных на различных физических принципах.

Широкое применение в системах автоматизации получили муфты с электромагнитным управлением, когда соединение ведущей и ведомой частей происходит не жестко механически, а за счет упругих сил электромагнитного поля. Это позволяет подключать двигатель к механизму без механических ударов; осуществлять передачу движения в изолированных друг от друга средах, а в ряде случаев и регулировать частоту вращения в системах управления.

В зависимости от связи ведущей и ведомой частей все муфты можно разделить на два класса: *муфты с механической связью* и *индукционные* муфты т.е. со связью через магнитное поле.

К первой группе относятся:

– *фрикционные*, или муфты сухого трения, у которых ведущая и ведомая части прижимаются друг к другу электромагнитными силами (рисунок 12). Эти муфты выполняются с одним или несколькими дисками с цилиндрическими или коническими поверхностями трения. Муфта состоит из двух полумуфт 5 и 6, соответственно связанных с валами 3 и 9, и обмотки 1, на которую подается напряжение через кольца 2 и щетки 4. Ведомая часть полумуфты 6 перемещается вдоль оси по шпонке 8 и связана валом 9 с рабочим механизмом. Ведомая полумуфта 6 отжимается от ведущей 5 пружиной 7. При подаче тока в обмотку возбуждения электромагнитное поле, преодолевая усилие пружины 7, притягивает ведомую полумуфту 6. За счет сил трения между полумуфтами 5 и 6 передается крутящий момент с ведущего вала на ведомый. Для увеличения передаваемого крутящего момента муфты изготавливают многодисковыми.

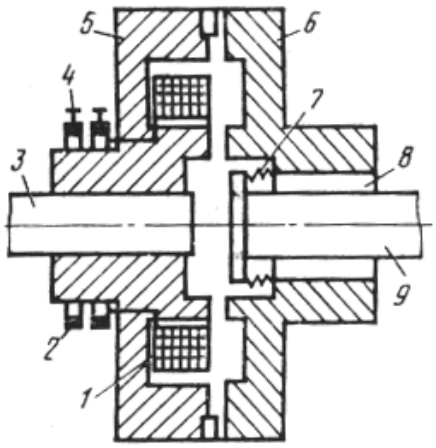


Рисунок 12 – Фрикционная муфта

– *порошковые (ферропорошковые)*, или муфты вязкого трения, в которых соединение между частями муфты происходит за счет намагничивания порошковой ферромагнитной смеси, заполняющей зазор между частями муфты. Муфта (рисунок 13) позволяет осуществлять либо жесткое соединение ведущей и ведомой частей муфты, либо проскальзывание ведомой части относительно ведущей. Это дает возможность регулировать частоту вращения приводного механизма при неизменной частоте вращения приводного двигателя.

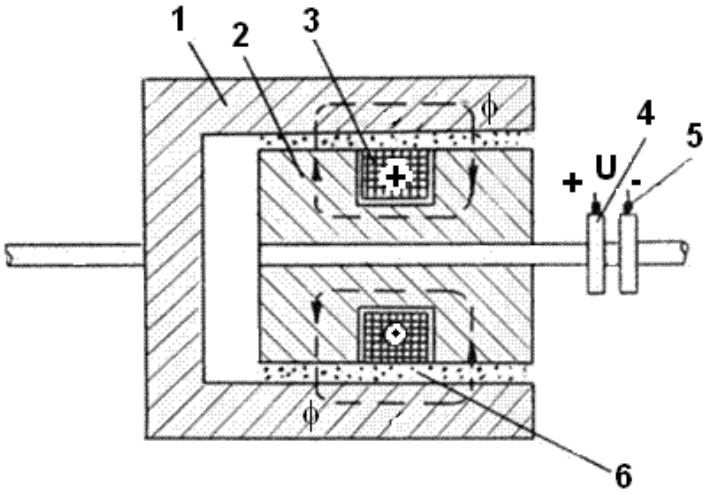


Рисунок 13 – Электромагнитная порошковая муфта

Ведущая 1 и ведомая 2 части муфты представляют собой стальные цилиндры и служат магнитопроводами. В кольцевом пазу ведомой части расположена обмотка возбуждения 3, которая через контактные кольца 4 и щетки 5 подключена к источнику постоянного тока U. Зазор между ведомой и ведущей частями муфты заполняется наполнителем 6, представляющим собой сухую или жидкую ферромагнитную смесь. Жидкая смесь состоит из ферромагнитного порошка и жидкой масляной основы. Сухая ферромагнитная смесь состоит также из ферромагнетика, а в качестве связующего вещества используются графит или тальк.

Принцип работы порошковой муфты заключается в следующем. При подаче постоянного напряжения U на обмотку возбуждения возникает ток, который создает поток возбуждения ϕ. Проходя через зазор поток намагничивает ферромагнетик. Намагниченные частицы ферромагнетика образуют магнитные цепочки, расположенные вдоль силовых линий магнитного поля. Эти цепочки соединяют силами притяжения ведущую и ведомую части муфты. Сила сцепления частей муфты и создаваемый электромагнитный момент тем больше, чем больше ток протекает через обмотку возбуждения порошковой муфты. При больших токах возбуждения наступает магнитное насыщение материала и постепенно прекращается нарастание сил сцепления, а следовательно, и электромагнитного момента. Таким образом, воздействуя электромагнитным полем на слой порошка, можно соединить ведущую и ведомую части муфты либо жестко, либо с проскальзыванием. Порошковые муфты по конструкции бывают не только цилиндрические, но и дисковые.

– *зубчатые* или кулачковые, у которых на ведущей и ведомой частях муфты имеются зубчики, с помощью которых при приложении электромагнитной силы осуществляется «геометрическое замыкание» (соединение) частей муфты.

Ко второй группе (индукционные) относятся:

– *асинхронные* или *муфты скольжения*, которые работают за счет сил электромагнитного воздействия, возникающих при вращении ведущей части муфты, имеющей катушку возбуждения, относительно ведомой части (принцип асинхронной машины). Электромагнитные (индукционные) муфты скольжения (ЭМС) представляют собой сочленение двух вращающихся одна относительно другой полумуфт: ведущую 1 и ведомую 2 (рисунок 14). Одна из полумуфт имеет обмотку возбуждения 3, а другая – ведомая – короткозамкнутую обмотку по типу ротора асинхронного электродвигателя. Для передачи энергии в обмотку возбуждения используются токосъемные кольца 4. Таким образом, ЭМС позволяет передавать крутящий момент от асинхронного двигателя 5 к рабочей машине 6 с изменением частоты вращения.

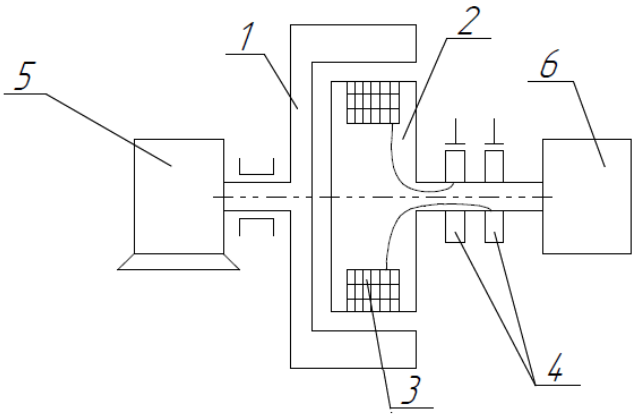


Рисунок 14 – Пример использования электромагнитной муфты

Имеются конструкции ЭМС, у которых ведущая часть представляет собой короткозамкнутый ротор, а ведомая часть – индуктор с обмоткой возбуждения. Принцип работы ЭМС аналогичен работе асинхронного электродвигателя. При снижении возбуждения ЭМС торможение осуществляется свободным выбегом до новой пониженной частоты вращения ведомой части:

– *синхронные* муфты с постоянными магнитами. Эти муфты имеют магнитопроводы с полюсами на обеих частях муфты. При прохождении тока через катушку возбуждения возникают силы магнитного притяжения между ведущей и ведомой частями (принцип синхронной машины с постоянными магнитами);

– *гистерезисные* муфты, в которых связь между ведущей и ведомой частями создается за счет явления гистерезиса при перемагничивании магнитотвердого материала (принцип синхронной гистерезисной машины);

Независимо от принципа действия любая из этих муфт является преобразователем механической мощности на входе в механическую мощность на выходе муфты.

3 ПРОГРАММА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить принципы работы, назначение, область применения исполнительных механизмов.
2. На основе учебного материала, изложенного в п. 3, 4, 5 и в рекомендованной литературе, а также используя натурные образцы изучить принципы работы и конструкции электрических исполнительных механизмов.
3. Включить имеющиеся в лаборатории исполнительные механизмы и убедиться в их работоспособности.

4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

В отчете необходимо привести эскизные конструктивные и электрические схемы испытанных и исследованных исполнительных механизмов с их кратким описанием, выводы по работе.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Каково назначение исполнительных механизмов в САУ (САР)? Поясните на примере.
3. Как используются исполнительные механизмы в системах дистанционного управления? Поясните на примере.
4. Как классифицируются исполнительные механизмы в зависимости от потребляемой энергии и какова их область применения?
5. Каков принцип работы электродвигательных исполнительных механизмов?
6. Какова конструкция и назначение потенциометрического датчика в механизме ЭМО-6,3/10?
7. Каков принцип работы электромагнитных исполнительных механизмов?
8. Каков принцип работы электромагнитных муфт сухого трения и где они применяются?
9. Каков принцип работы электромагнитных муфт вязкого трения и где они применяются?
10. Каков принцип работы электромагнитных муфт скольжения (ЭМС) и где они применяются?
11. Какой вид имеют механические характеристики ЭМС?
12. Каков принцип работы шаговых исполнительных механизмов?

Лабораторная работа № 2
БЕСКОНТАКТНЫЕ ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

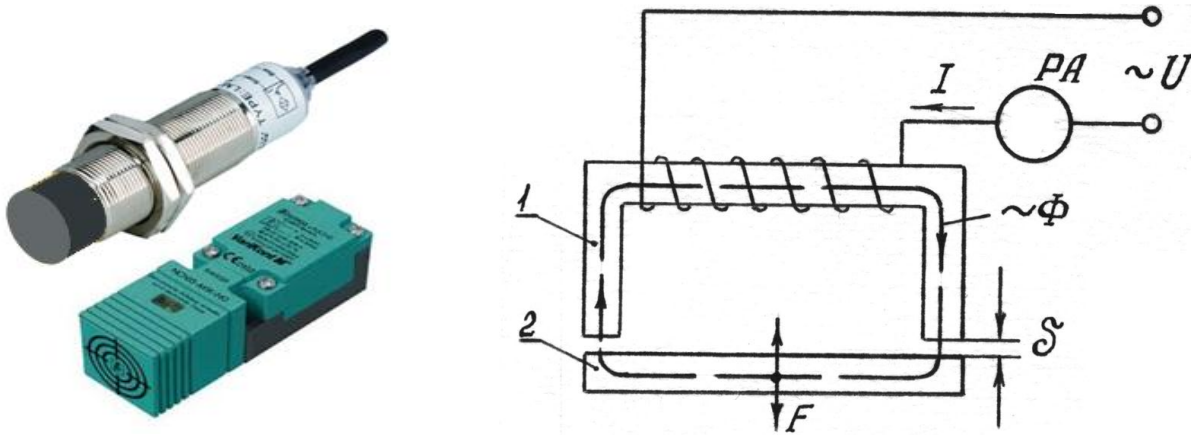
1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение принципов действия, назначения и исследование индуктивных, трансформаторных, индукционных и емкостных датчиков перемещения и положения.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Индуктивные датчики

Принцип действия индуктивных датчиков основан на изменении индуктивности обмотки со стальным сердечником при смещении подвижной части магнитопровода (якоря) относительно сердечника. В простейшем (одинарном) индуктивном датчике (рисунок 15) на обмотку подается напряжение ~ U переменного тока, возбуждающее переменный магнитный поток – Ф. Против полюсов сердечника находится подвижный плоский якорь. Между якорем и сердечником имеется воздушный зазор δ. Якорь механически соединяется с управляемым объектом. Входной величиной датчика является воздушный зазор δ, выходной – ток I. Перемещение якоря под воздействием усилия со стороны управляемого объекта вызывает изменение воздушного зазора и как следствие индуктивности L обмотки.



а) *б)*

1 – сердечник с обмоткой; 2 – подвижный плоский якорь

Рисунок 15 – Варианты исполнения индуктивных датчиков (*а*) и схема простейшего индуктивного датчика с плоским подвижным якорем (*б*)

Зависимость индуктивности обмотки от параметров датчика выражается формулой

$$L = \frac{2\pi W^2 S}{\delta} 10^{-7},$$

где W – число витков обмотки;

S – площадь сечения сердечника обмотки;

δ – воздушный зазор между якорем и сердечником.

Изменение индуктивности L приводит к изменению индуктивного сопротивления обмотки $X_L = \omega L$, а следовательно, и полного сопротивления Z. В результате этого в цепи обмотки изменяется величина тока

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}},$$

где R – активное сопротивление обмотки и приборов в ее цепи;

ω – угловая частота тока питающей сети.

Зависимость тока датчика от воздушного зазора $I = f(\delta)$ называется его статической характеристикой.

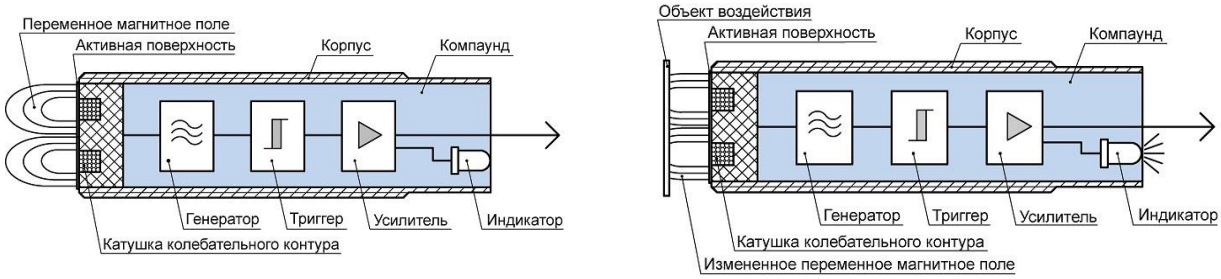
Если обозначить усилие, действующее на якорь со стороны управляемого объекта, через F, то в индуктивном датчике будет иметь место следующая цепь преобразований физических величин:

$$F \rightarrow \delta \rightarrow L \rightarrow X_L \rightarrow Z \rightarrow I.$$

Один из важных параметров датчика является его чувствительность k. Без учета активного сопротивления цепи обмотки ввиду того, что $X_L > R$

$$k = \frac{dI}{d\delta} = \frac{U 10^7}{2\pi W^2 \omega S}.$$

Простейший индуктивный датчик с плоским якорем имеет ряд недостатков (низкая чувствительность, малая величина линейного участка статической характеристики, при малых изменениях δ на якорь датчика действует значительное усилие), вследствие которых он непосредственно не находит применения. Для практического применения индуктивный датчик используется как часть генератора, в котором происходит изменение амплитуды колебаний при внесении в активную зону датчика металлического, магнитного, ферромагнитного или аморфного материала определенных размеров. При подаче питания в области чувствительной поверхности датчика образуется изменяющееся магнитное поле, наводящее во внесенном в зону материале вихревые токи, которые приводят к изменению амплитуды колебаний генератора. В результате вырабатывается аналоговый выходной сигнал, величина которого изменяется от расстояния между датчиком и контролируемым предметом. Триггер преобразует аналоговый сигнал в логический. Устройство индуктивного датчика общего применения показано на рисунке 16. При попадании токопроводящего объекта в зону чувствительности, изменяются параметры генератора, что вызывает срабатывание триггера и изменение состояния выхода датчика.



а) *б)*

а – при отсутствии контролируемого объекта; *б* – контролируемый объект находится в зоне чувствительности датчика

Рисунок 16 – Структурная схема индуктивного датчика общего применения

Индуктивный датчик общего применения состоит из следующих элементов:

– *Катушка колебательного контура* обычно выполненная на ферритовом сердечнике, являющаяся частью генератора, создает переменное магнитное поле для взаимодействия с объектом.
– *Триггер* обеспечивает необходимый порог срабатывания, гистерезис, крутизну фронтов сигнала управления. В датчиках с аналоговым сигналом, триггер отсутствует.
– *Усилитель* увеличивает амплитуду и рабочий ток выходного сигнала до необходимых значений. В качестве усилителя может применяться электромагнитное реле.
– *Индикатор* – обычно светодиодный, обеспечивает визуальный контроль срабатывания датчика, увеличивая удобство эксплуатации, уменьшая время настройки.
– *Компаунд* обеспечивает необходимую степень защиты от вредного воздействия твердых частиц и влаги.
– *Корпус*. В цилиндрических датчиках чаще всего выполняется из латуни и нержавеющей стали. В прямоугольных и других исполнениях применяются ударопрочные пластики. Корпус служит для обеспечения монтажа датчика и защиты от механических и прочих внешних воздействий.

Индуктивные бесконтактные датчики наиболее эффективно использовать в качестве конечных выключателей в автоматических линиях, станках и т.п., так как они срабатывают только на металлы и не чувствительны к остальным материалам. Это увеличивает их защищенность от помех; например, введение в зону чувствительности выключателя рук оператора, эмульсии, воды, смазки и т.д. не приведет к ложному срабатыванию.

2.2 Трансформаторные датчики

В трансформаторном (взаимоиндуктивном) датчике (рисунок 17) обмотка возбуждения питается переменным напряжением ~ U, создающим в магнитопроводе переменный магнитный поток ~ Ф. Во вторичной обмотке

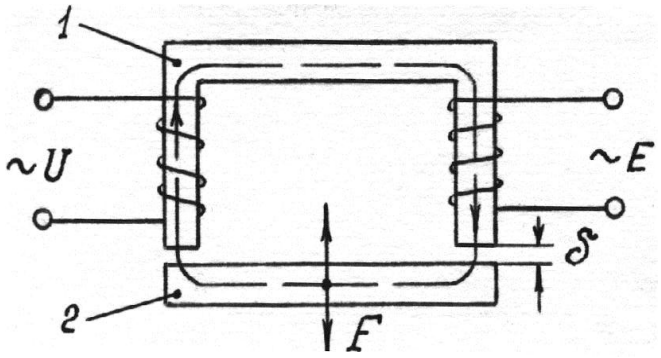
индуктируется ЭДС, величина которой находится в определенной зависимости от воздушного зазора δ. Если значение тока питающей обмотки поддерживать неизменным, то ЭДС:

$$E = \omega W_2 \Phi = f(\delta),$$

где ω – угловая частота тока питающей сети;

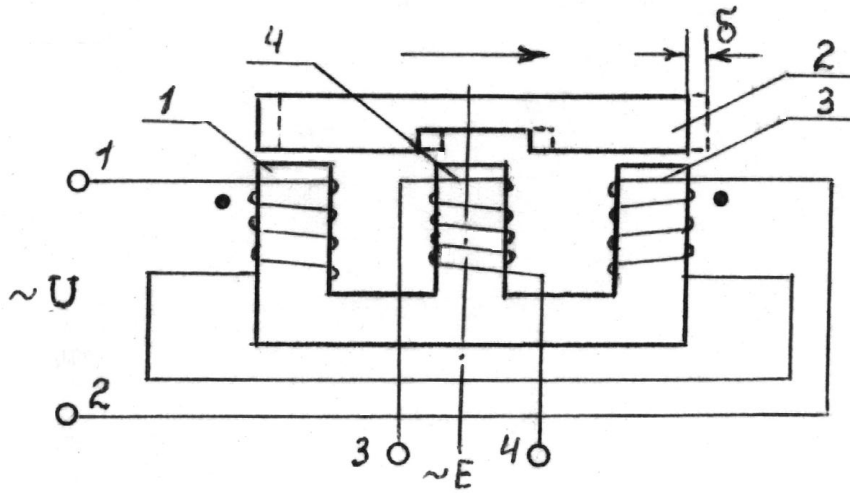
W_2 – число витков вторичной обмотки;

Φ – магнитный поток [при U = const, $\Phi = \alpha(\delta)$].



1 – сердечник с обмотками; 2 – подвижный якорь

Рисунок 17 – Схема простейшего трансформаторного датчика с плоским подвижным якорем



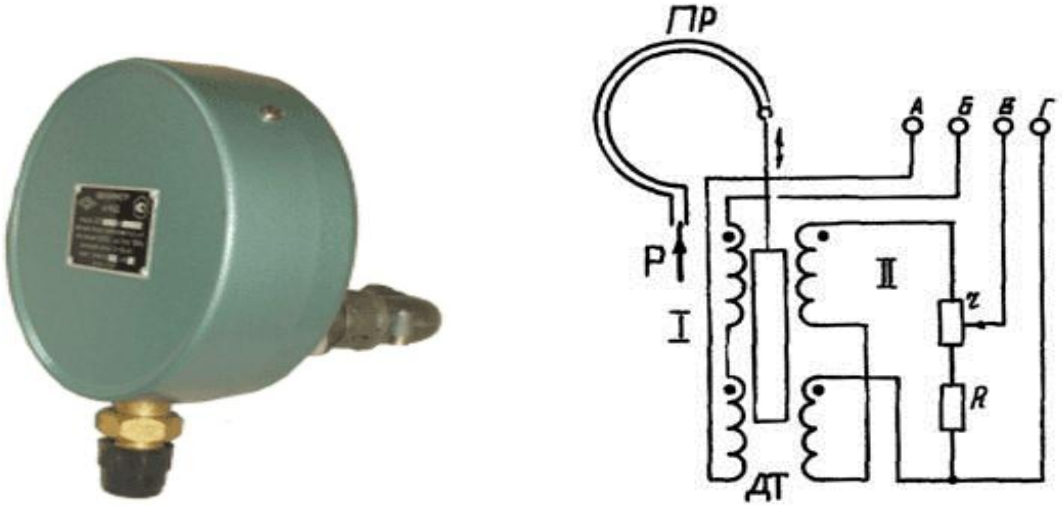
1 – неподвижный сердечник; 2 – подвижный якорь; 3 – первичная обмотка; 4 – вторичная обмотка

Рисунок 18 – Схема трансформаторного дифференциального датчика линейных перемещений

Таким образом ЭДС E будет функционально зависеть от величины δ. Трансформаторные датчики используют для измерения линейных и угловых перемещений. Также, как и у индуктивных, у трансформаторных датчиков лучшими характеристиками обладают дифференциальные датчики (рисунок 18). У трансформаторного дифференциального датчика линейных перемещений при смещении подвижного якоря δ = 0 ЭДС E во вторичной обмо-

тке не наводится, поскольку магнитные потоки, создаваемые секциями первичной обмотки, равны и направлены встречно. Когда подвижный якорь смещается, магнитное сопротивление для потока одной секции первичной обмотки увеличивается, а для потока второй секции – уменьшается, вследствие чего на выходе датчика появляется ЭДС Е, фаза которой будет зависеть от направления смещения подвижного якоря.

Аналогичная дифференциальная схема использована в трансформаторном датчике манометра МЭД для измерения избыточного давления (рисунок 19).



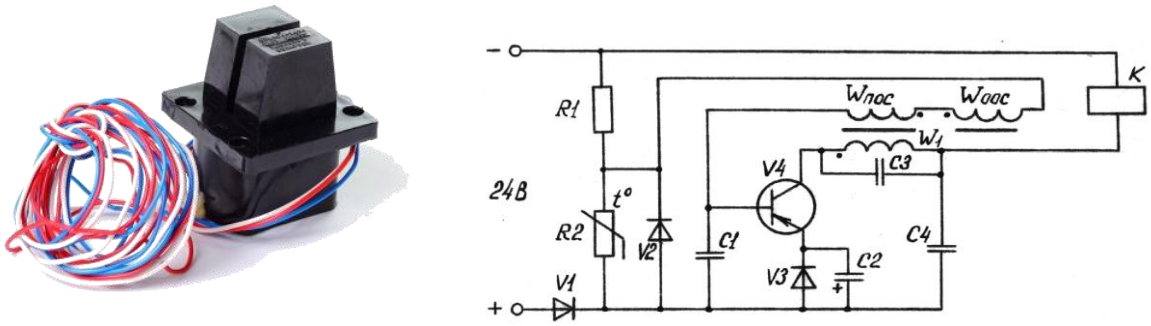
а) *б)*

I – первичная обмотка; II – вторичная обмотка; ДТ -– дифференциальный трансформатор; Р – измеряемое давление; ПР – пружина; R – постоянный резистор; r – переменный резистор

Рисунок 19 – Внешний вид (*а*) и схема (*б*) манометра МЭД

Использование электронной техники позволяет строить на базе трансформаторных датчиков малогабаритные устройства, предназначенные для контроля подвижных объектов. К их числу относится серийно выпускаемый бесконтактный путевой переключатель БВК-24 (рисунок 20). Основным элементом схемы переключения БВК-24 является блокинг-генератор на транзисторе, работающий в ждущем режиме. В схеме генератора имеется трансформатор с тремя обмотками. Две обмотки $W_{пос}$, W_{ooc} (положительной обратной связи и отрицательной обратной связи) находятся в базовой цепи транзистора, а обмотка W_1 – в цепи питания коллектора. При этом питание в коллекторную цепь подается через катушку реле К. Обмотка отрицательной обратной связи W_{ooc} намотана на отдельном ферритовом сердечнике, находящемся на расстоянии 6–8 мм от сердечника обмоток W_1 и $W_{пос}$. При введении в зазор датчика металлической пластины уменьшается противодействующее влияние обмотки отрицательной обратной связи. Разность потенциалов на базе транзистора становится отрицательной, блокинг-генератор переходит в режим генерации колебания, что приводит к открыванию тран-

зистора и срабатыванию реле в его коллекторной цепи. При удалении пластины из зазора обмотка отрицательной обратной связи W_{ooc} компенсирует действие обмотки положительной обратной связи $W_{пос}$ колебания затухают и разность потенциалов на базе транзистора становится положительной. Транзистор закрывается, а реле в его коллекторной цепи выключается.



а) *б)*

Рисунок 20 – Внешний вид (*а*) и принципиальная электрическая схема (*б*) путевого переключателя БВК

Датчики этого типа широко используются в сельскохозяйственном производстве для управления подвижными объектам в животноводстве, так как их конструктивное исполнение обеспечивает применение в условиях химически агрессивной среды.

2.3 Индукционные (магнитоиндукционные) датчики

Основными элементами индукционных датчиков, работающих на основе закона электромагнитной индукции, являются катушка и магнитная система (постоянный магнит, рисунок 21 *б*). Они применяются для контроля скорости подвижных объектов и элементов производственных механизмов. Эти датчики подразделяются на две группы. В датчиках первой группы катушка устанавливается на подвижном контролируемом объекте, а постоянный магнит – неподвижно. При прохождении катушки около магнита в ней наводится ЭДС:

$$E = kBv,$$

где v – линейная скорость движения контролируемого объекта;

B – составляющая магнитной индукции, перпендикулярная вектору скорости v;

k – постоянный коэффициент, зависящий от количества и размера витков, а также формы и материала магнитной системы.

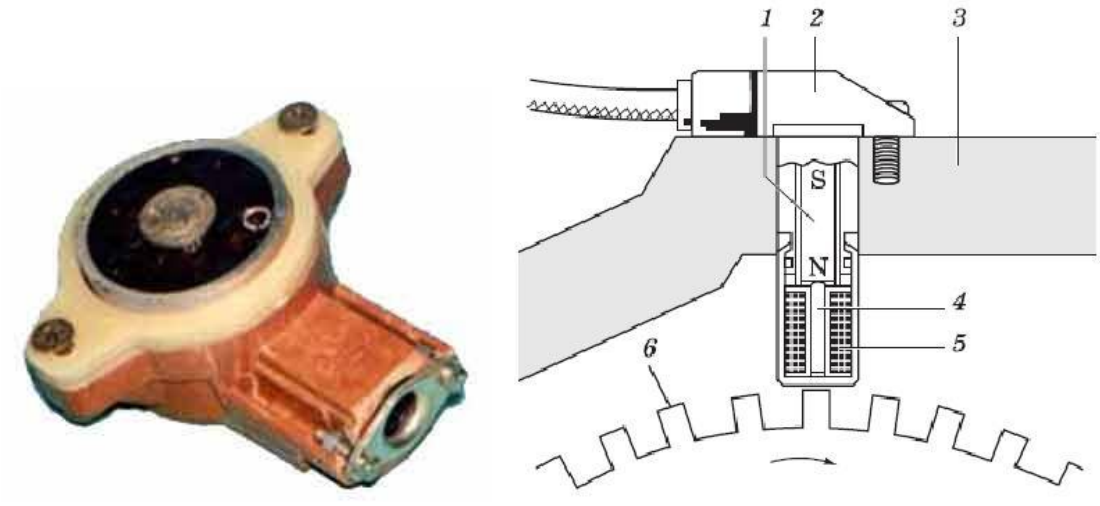
У датчиков второй группы катушка и ее магнитная система устанавливаются неподвижно, а под воздействием ферромагнитной массы контролируемого объекта или связанной с ним специальной ферромагнитной пластины изменяется магнитный поток Ф, сцепленный с катушкой. Электродвижущиеся силы таких датчиков пропорциональна и обратна по знаку скорости изменения потока, а следовательно, скорости контролируемого объекта

$$E = -k\frac{d\Phi}{dt},$$

где k – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров датчика (количества витков геометрических размеров катушки и т.п.).

Индукционные датчики позволяют по значению ЭДС судить о величине и скорости линейных и угловых перемещений.

К числу индукционных датчиков второй группы относятся датчик ДМ-2 (рисунок 21 *а*), исследуемый в данной работе, а также датчики контроля частоты вращения в системе контроля комбайнов «Дон».



а) б)

1 – постоянный магнит; 2 – корпус; 3 – крепление датчика; 4 – сердечник; 5 – обмотка; 6 – зубчатое колесо

Рисунок 21 – Индукционный датчик типа ДМ-2 (*а*) и использование датчика для контроля частоты вращения зубчатого колеса (*б*)

2.4 Емкостные датчики

Емкостный датчик – измерительный преобразователь неэлектрических величин (уровня жидкости, механические усилия, давления, влажности и др.) в значения электрической ёмкости. Конструктивно емкостный датчик представляет собой конденсатор электрический плоскопараллельный или цилиндрический. Различают емкостные датчики, действие которых основано на изменении зазора между пластинами или площади их взаимного перекрытия, деформации диэлектрика, изменении его положения, состава или диэлектрической проницаемости (рисунок 22). Наиболее часто емкостные датчики применяют для измерений меняющихся давления или уровня, точных измерений механических перемещений и т.п.

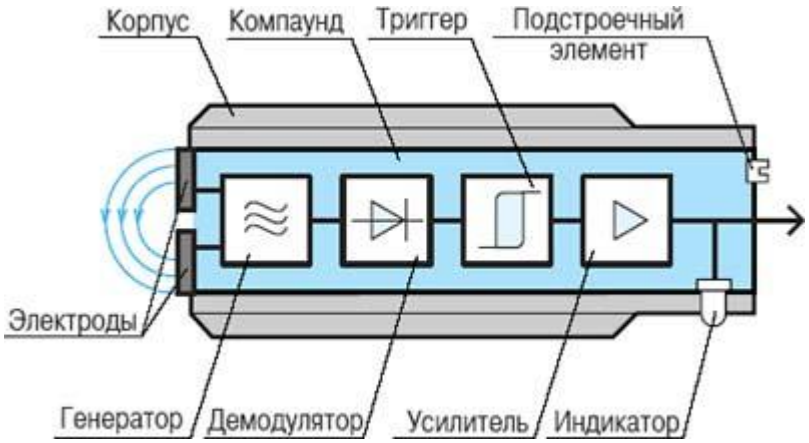


Рисунок 22 – Устройство емкостного датчика

Емкостный бесконтакный датчик функционирует следующим образом: генератор обеспечивает электрическое поле взаимодействия с объектом, демодулятор преобразует изменение амплитуды высокочастотных колебаний генератора в изменение постоянного напряжения, триггер обеспечивает необходимую крутизну фронта сигнала переключения и значение гистерезиса, усилитель увеличивает выходной сигнал до необходимого значения, светодиодный индикатор показывает состояние выключателя, обеспечивает работоспособность, оперативность настройки. Компаунд обеспечивает необходимую степень защиты от проникновения твердых частиц и воды, а корпус обеспечивает монтаж выключателя, защищает от механических воздействий.

Активная поверхность емкостного бесконтактного датчика образована двумя металлическими электродами, которые можно представить как обкладки «развернутого» конденсатора (рисунок 22). Электроды включены в цепь обратной связи высокочастотного автогенератора, настроенного таким образом, что при отсутствии объекта вблизи активной поверхности он не генерирует. При приближении к активной поверхности емкостного бесконтактного датчика объект попадает в электрическое поле и изменяет емкость обратной связи. Генератор начинает вырабатывать колебания, амплитуда которых возрастает по мере приближения объекта. Амплитуда оценивается последующей схемой обработки, формирующей выходной сигнал. Емкостные бесконтактные датчики срабатывают как от электропроводящих объектов, так и от диэлектриков. При воздействии объектов из электропроводящих материалов реальное расстояние срабатывания максимально, а при воздействии объектов из диэлектрических материалов расстояние уменьшается в зависимости от диэлектрической проницаемости материала.

При применении емкостных датчиков важно защититься от ложных срабатываний, которые могут быть вызваны, например, атмосферными осадками (налипание снега), технологическими жидкостями и др. (случайное прикосновение оператора к выключателю также вызовет его срабатывание). Для настройки чувствительности датчика к определенному материалу может

использоваться подстроечный элемент (рисунок 22). Наибольший эффект достигается при использовании в системах контроля уровня наполнения резервуаров, емкостей, контейнеров сыпучими и жидкими материалами; контроля уровня содержимого в упаковке, в таре; сигнализации разрыва лент; счета и позиционирования объектов любого рода.

Конструктивное исполнение емкостных датчиков аналогично индуктивным датчикам (см. рисунок 15 *а*).

3 ПРОГРАММА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1 Программа выполнения работы

1. Экспериментально определить статическую характеристику I = f(δ) простейшего (одинарного) индуктивного датчика (рисунок 15).
2. Экспериментально определить статическую характеристику E = f(δ) трансформаторного датчика (рисунок 17).
3. Экспериментально определить статическую характеристику дифференциального трансформаторного датчика (рисунок 18). На основе общего принципа работы трансформаторных датчиков выполнить анализ работы дифференциальных трансформаторных датчиков (рисунки 18, 19). Проверить свои выводы экспериментально путем визуального наблюдения их выходных сигналов на экране осциллографа.
4. Изучить индуктивный датчик (схему и конструкцию). Экспериментально проверить работоспособность индуктивного датчика ВБ2.18М (рисунки 15, 16). Напряжение питания датчика – 10–30 В.
5. Изучить емкостный датчик (схему и конструкцию). Экспериментально проверить работоспособность индуктивного датчика ВБ1.30М (рисунок 22). Напряжение питания датчика – 10–30 В.
6. На основе теоретических предпосылок проанализировать работу индукционного датчика ДМ-2 (рисунок 21). Установить, как влияет скорость перемещения ферромагнитного шунта на амплитуду сигнала и проверить свое заключение экспериментально посредством визуального наблюдения выходного сигнала датчика на экране осциллографа.

3.2 Порядок выполнения работы

1. Изучить схемы и конструкции макетов датчиков, манометра МЭД, магнитоиндукционного датчика ДМ-2, индуктивного датчика ВБ2.18М, емкостного датчика ВБ1.30М, установленных на лабораторном стенде.
2. Снять статическую характеристику I = f(δ) простейшего индуктивного датчика (рисунок 23). Для этого необходимо:
   - включить тумблер S2;
   - с помощью винта, связанного с подвижным якорем, установить воздушный зазор между якорем и сердечником δ = 0;

- клеммы 1, 3 подключить через миллиамперметр к регулируемому источнику напряжения (клеммы 9, 10);
- для контроля напряжения к клеммам 9, 10 подключить вольтметр;
- установив напряжение питания в пределах 10–20 В (по указанию преподавателя), снять зависимость тока I в цепи датчика от величины воздушного зазора δ.

3. Снять статическую характеристику трансформаторного датчика (рисунок 23). Для этого необходимо:
   - отключить тумблер S2;
   - с помощью винта, связанного с подвижным якорем, установить воздушный зазор между якорем и сердечником $\delta = 0$;
   - первичную обмотку датчика (клеммы 3, 4) подключить к регулируемому источнику питания (клеммы 9, 10);
   - для контроля напряжения к клеммам 9, 10 подключить вольтметр;
   - к вторичной обмотке датчика (клеммы 1, 2) подключить вольтметр;
   - установив напряжение питания в пределах 6–12 В (по указанию преподавателя), снять зависимость E от величины воздушного зазора δ.

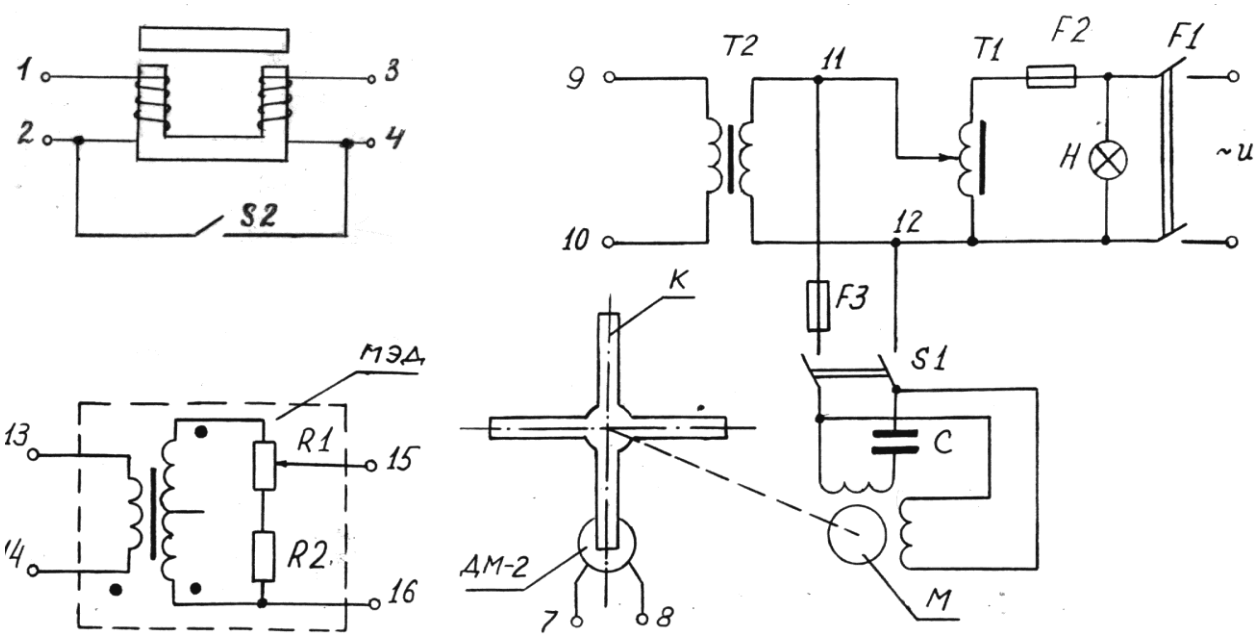


Рисунок 23 – Принципиальная схема лабораторной установки

4. Снять статическую характеристику дифференциального трансформаторного датчика (см. рисунок 18). Для этого необходимо воспользоваться дополнительным блоком и выполнить следующее:
   - с помощью винта установить подвижный якорь в нейтральное положение;
   - первичную обмотку трансформаторного датчика (клеммы 1, 2) подключить к регулируемому источнику питания (клеммы 9, 10);

- для контроля напряжения к клеммам 9, 10 подключить вольтметр;
- к вторичной обмотке датчика (клеммы 3, 4) подключить вольтметр;
- установив напряжение питания в пределах 0–50 В (по указанию преподавателя), снять зависимость ЭДСЕ от горизонтального перемещения подвижного якоря δ для положительных и отрицательных значений δ (перемещая якорь вправо принять за положительное, а влево – за отрицательное);
- с помощью осциллографа провести визуальное наблюдение выходного сигнала в пределах малых положительных и отрицательных перемещений подвижного якоря относительно нейтрального положения.

5. С помощью осциллографа провести визуальное наблюдение выходного сигнала трансформаторного датчика манометра МЭД (рисунки 19, 23). Для этого необходимо:
   - подключить первичную обмотку датчика (клеммы 13, 14) через миллиамперметр к источнику регулируемого напряжения (клеммы 9, 10);
   - установить автотрансформатором Т1 величину тока не более 125 мА;
   - к выходу датчика (клеммы 15, 16) подключить осциллограф;
   - изгибая в небольших пределах манометрическую пружину, по виду сигнала на экране осциллографа убедиться в работоспособности датчика и установить качественную связь величины и знака смещения плунжера (сердечника датчика) с амплитудой и фазой выходного сигнала.
6. Проверить работоспособность индуктивного датчика ВБ2.18М и емкостного датчика ВБ1.30М, для этого:
   - подключить питание к датчикам (соединить клемму 11 с «−» 14V и клемму 12 с «+» 14V);
   - после проверки преподавателем включить стенд;
   - посредством приближения предметов из различных материалов к датчикам убедитесь в их работоспособности. При срабатывании переключателя должен загореться светодиод на корпусе датчика.
7. С помощью осциллографа выполнить визуальное наблюдение выходного сигнала индукционного датчика ДМ-2. Для этого необходимо:
   - подключить к выходу датчика (клеммы 7, 8) осциллограф;
   - тумблером S1 включить электродвигатель М, на валу которого закреплена крестовина Х, предназначенная для имитации перемещения контролируемого объекта (рисунок 23);
   - изменяя частоту вращения крестовины путем изменения напряжения питания электродвигателя М в пределах до 127 В, определить зависимость амплитуды импульсов датчика от скорости контролируемого объекта.

4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать схемы датчиков, исследуемых в лабораторной работе, графики, построенные по опытным данным, необходимые расчеты, а также выводы в соответствии с программой работы (п. 3).

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков принцип работы индуктивных датчиков?
2. Какова цепь преобразования физических величин в индуктивном датчике?
3. Каков принцип работы трансформаторных датчиков?
4. Какова цепь преобразования физических величин в трансформаторном датчике?
5. Каков принцип работы трансформаторных дифференциальных датчиков?
6. Каков принцип работы бесконтактного путевого переключателя БВК-24?
7. Какова область применения индуктивных и трансформаторных датчиков?
8. В чем сущность закона электромагнитной индукции, на основе которого работают индукционные датчики?
9. Какова особенность конструкции и принципа действия индукционных датчиков первой и второй группы?
10. Какова цепь преобразований физических величин в индукционных датчиках первой и второй группы?
11. Какова область применения индукционных датчиков?
12. Каков принцип действия емкостных датчиков?
13. Какова область применения емкостных датчиков?

Лабораторная работа № 3
ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение принципа действия датчиков температуры и исследование характеристик полупроводниковых терморезисторов.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Тепломеханические датчики

К датчикам, использующим принцип теплового расширения жидкостей, газов и твердых тел относятся жидкостные, манометрические, биметаллические и дилатометрические термодатчики.

Жидкостные датчики (рисунок 24) преобразуют изменение температуры $\Delta\theta$ в изменение Δh высоты столба жидкости (ртути, спирта) в капилляре

$$\Delta h = \Delta V / S_к ,$$

где ΔV – изменение объема жидкости;

$S_к$ – сечение капилляра.

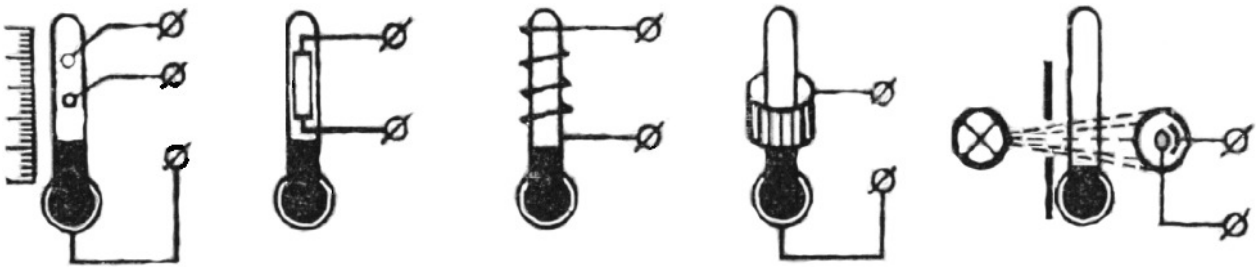


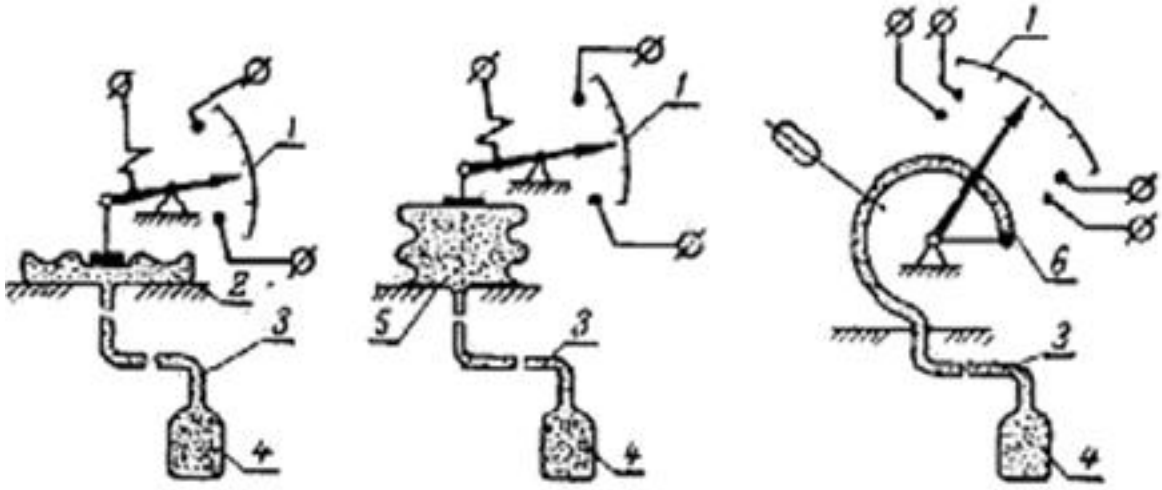
Рисунок 24 – Принципиальные схемы жидкостных датчиков температуры

Жидкость, находящаяся в капиллярах датчиков может за счет своей электропроводности замыкать или размыкать контакты датчика (рисунок 24 *а*), закорачивать частично или полностью резистор и таким образом изменять его «омическое» сопротивление (рисунок 24 *б*), заполняя внутреннюю полость индуктивной катушки (рисунок 24 *в*), изменять магнитные характеристики каркаса, на котором намотана катушка, что приводит к изменению его индуктивности.

Жидкостные датчики просты по устройству, но недолговечны и не обеспечивают необходимой точности в условиях вибраций.

Манометрические датчики (рисунок 25) преобразуют тепловое изменение объема ΔV жидкости или газа (ртуть, спирт, ацетон, эфир, азот, инертные газы) в перемещение ΔX специальных мембран, сильфонов или манометрических трубок. Они состоят из теплоприемника 4, соединительной капиллярной трубки 3 и измерительного элемента, представляющего собой

специальную мембрану 2, сильфон 5 или пружинную трубку 6. Указательная стрелка, связанная с измерительным органом, движется по температурной шкале 1, замыкая контакты при достижении предельных значений.



а) *б)* *в)*

а – мембранного; *б* – сильфонного;
в – манометрической пружинной трубки (трубки Бурдона)
Рисунок 25 – Принципиальные схемы манометрических датчиков температуры

На рисунке 26 представлены общие виды манометрических термометров. Они состоят из термобаллона, соединительной капиллярной трубки и измерительного показывающего прибора. Эти термометры могут быть снабжены электроконтактными устройствами для сигнализации или автоматического управления.



а) *б)* *в)*

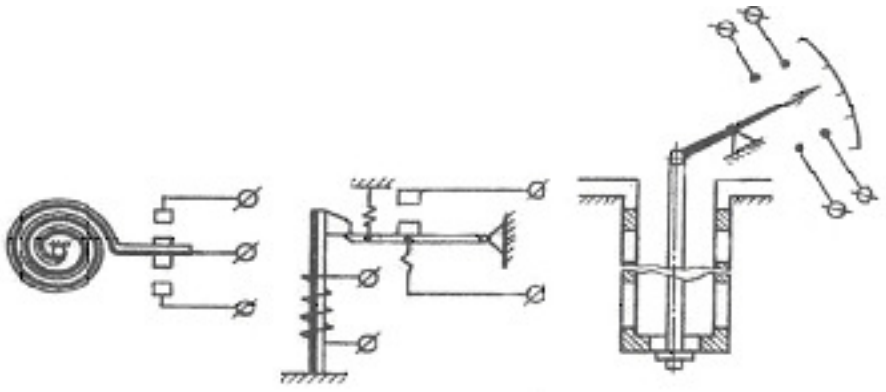
а – термометр Wika 70; *б* – термометр ТКП-160С; *в* – термометр ТМП-160
Рисунок 26 – Манометрические термометры

Существенным недостатком манометрических датчиков является значительная инерционность и погрешность (1–2,5%). Их преимущества – малая стоимость, простота монтажа и эксплуатации.

Биметаллические и дилатометрические датчики и реле (рисунок 27) преобразуют изменения температуры $\Delta\theta$ в изменение линейных размеров твердых тел $\Delta\ell$.

У биметаллических термореле (рисунок 27 *а*) воспринимающим органом служит биметаллическая, то есть двойная (из двух разных металлов), спираль. Пластины спирали при нагревании удлиняются неодинаково, поэтому она изгибается в сторону металла с меньшим коэффициентом теплового расширения и по достижении определенной температуры замыкает контакты. Существенный недостаток этого реле заключается в том, что его контакты срабатывают недостаточно четко и вследствие этого подгорают.

В усовершенствованной конструкции термореле (рисунок 27 *б*) биметаллическая пластина, изгибаясь, освобождает пружину, которая обеспечивает резкое срабатывание контактной системы.



а) *б)* *в)*

а – биметаллическое спиральное реле; *б* – биметаллическое пружинное реле с электроподогревателем; *в* – дилатометрический термодатчик

Рисунок 27 – Принципиальные схемы биметаллических и дилатометрических датчиков и реле температуры

У дилатометрического термодатчика (рисунок 27 *в*) стержень из металла с малым коэффициентом температурного расширения расположен внутри трубки, изготовленной из металла с большим коэффициентом теплового расширения, и одним концом жестко к ней прикреплен. Для уменьшения тепловой инерции в стенках трубки просверлены отверстия. При изменении температуры изменяется длина трубки, вследствие чего происходит перемещение внутреннего стержня, со свободным концом которого связана указательная стрелка.

Из-за больших погрешностей и ряда других недостатков биметаллические и дилатометрические термодатчики применяются весьма редко, в основном для защиты электродвигателей от перегрева. Ток электродвигателя пропускают либо по самой биметаллической пластине, либо по расположенным рядом с ней нагревательным виткам.

2.2 Термоэлектрические датчики

Термоэлектрические датчики преобразуют входное тепловое воздействие в выходной сигнал в виде электродвижущей силы (ЭДС). Среди этих датчиков наибольшее применение получили *термопары*, предназначенные для дистанционного измерения и контроля температуры в широких пределах (от –100 до +2000 ^{0}C). Термопара является самым распространенным типом датчика температуры в автоматизации технологических процессов.

Эффект преобразования тепла в ток носит название *термоэлектрического эффекта* или *эффекта Зеебека*. Эффект Зеебека состоит в том, что в замкнутой цепи, состоящей из разнородных проводников, возникает термо-ЭДС, если места контактов поддерживают при разных температурах. Цепь, которая состоит только из двух различных проводников, называется термоэлементом или *термопарой* (рисунок 28). Суть этого эффекта в следующем: если вдоль проводника существует градиент температур (то есть температура конкретной точки проводника зависит от координаты), то электроны на горячем конце приобретают более высокие энергии и скорости, чем на холодном. В результате возникает поток электронов от горячего конца к холодному и на холодном конце накапливается отрицательный заряд, а на горячем остаётся нескомпенсированный положительный заряд. Процесс накопления заряда продолжается до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не вызовет поток электронов в обратном направлении, равный первичному, благодаря чему установится равновесие. А так как процесс нагрева происходит непрерывно, мы получаем непотенциальную силу, способную разделять заряды на концах термопары.

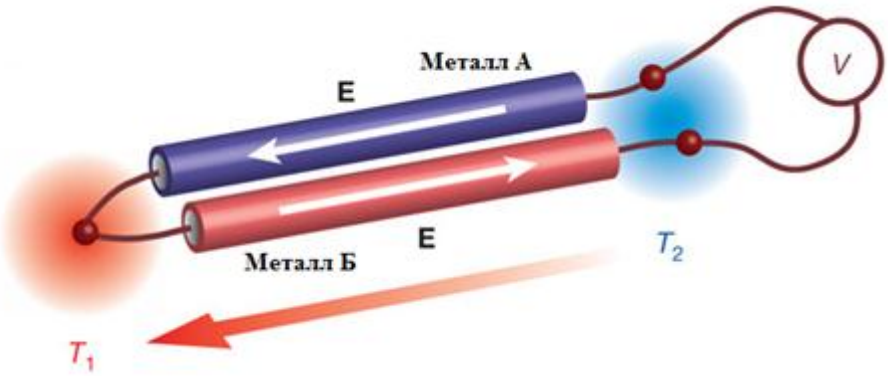


Рисунок 28 – Принцип действия термопары

В качестве материалов термопары используют различные металлы и сплавы. В таблице 1 приведены обозначения и характеристики выпускаемых промышленностью термопар.

Величина трмо-ЭДС на свободных (холодных) концах определяется по формуле

$E = k (\theta - \theta_x)$,

где θ, θ_x – температура соответственно спая (измеряемой среды) и свободных (холодных) концов;

k – коэффициент пропорциональности, зависящий от материала проводников.

Таблица 1 – Сводная таблица типов термопар

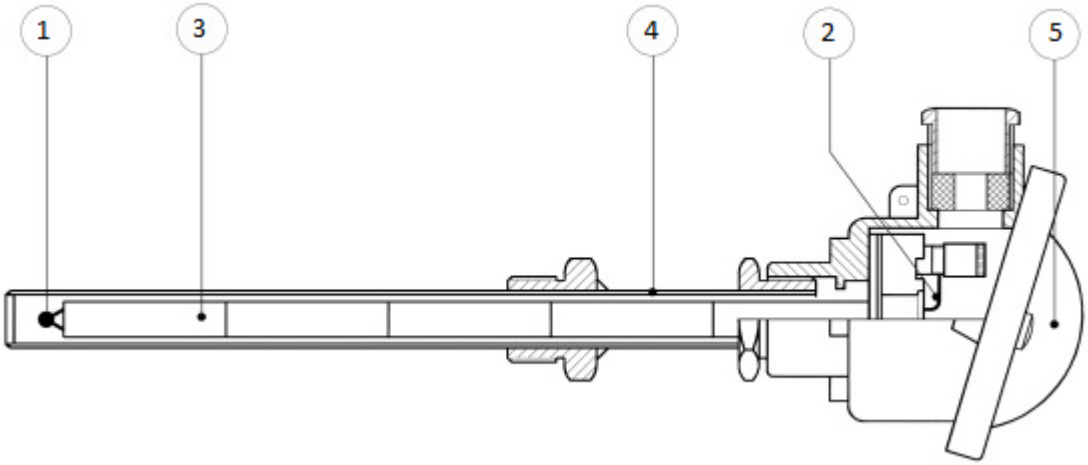
Тип термопары	Сплав элемента	Российская маркировка	Температурный диапазон
U	медь-медьникелевые		-200–500 °С
L	хромель, копель	ТХК	-200–850 °С
B	платинородий-платинородиевые	ТПР	100–1800 °С
S	платинородий-платиновые	ТПП	0–1700 °С
R	платинородий-платиновые	ТПП	0–1700 °С
N	нихросил нисил	ТНН	-200–1300 °С
E	хромель-константановые	ТХКн	0–600 °С
T	медь-константановые	ТМК	-200–400 °С
J	железо-константановые	ТЖК	-100–1200 °С

Для определения температуры θ по значению ЭДСЕ термопары пользуются их экспериментальными градуировочными зависимостями $E = f(\theta)$.

Для того, чтобы ЭДС зависела только от температуры спая термопары в измерительные схемы подключают с помощью достаточно протяженных компенсационных проводов, изготовленных из тех же материалов, что и термопары. Кроме того, вынесенные из контролируемой среды холодные концы термопар изолируют тепловой изоляцией от окружающей среды. Для этих целей применяют специальные компенсационные коробки и схемы.

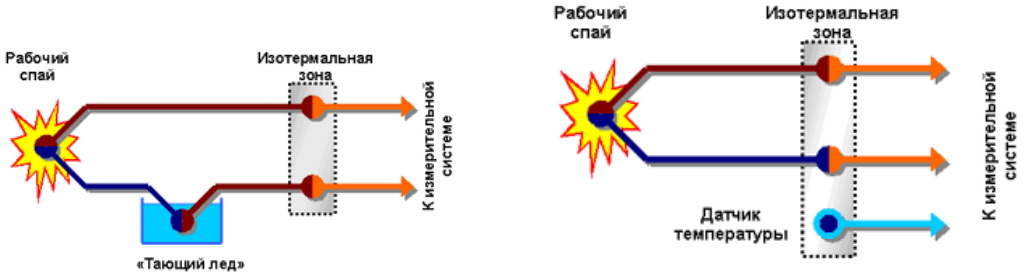
Поскольку ЭДС термопар сравнительно невелико, их не используют в качестве источников напряжения. Основная область применения термопар – измерение температуры, так как ЭДС очень зависима от разности температур концов.

Основными достоинствами термопар можно считать высокую точность измерений (до десятых долей градуса), большой температурный диапазон (от -200 до +2500 ^{o}C), простоту в изготовлении и эксплуатации, дешевизну и надежность. Однако они имеют и некоторые недостатки: влияние температуры свободных концов на измерение температуры спая, протекание тока через спай в момент измерения приводит к охлаждению горячего спая, зависимость ЭДС от температуры не является линейной.



1 – горячий спай; 2 – керамические изоляторы; 3 – керамическая защитная оболочка; 4 – наружная оболочка; 5 – крышка гловки выводов

Рисунок 29 – Конструкция термопары



а) б)

а – при помощи термостатирования; *б* – при помощи дополнительного датчика температуры

Рисунок 30 – Способы компенсации температуры холодного спая

Существуют различные способы избежать эффекта влияния температуры холодного спая на величину термо-ЭДС. Самым очевидным из них является поддержание температуры холодного спая постоянной. В лабораторных условиях часто применяется ванна с тающим льдом (рисунок 30 *а*). В этом случае термо-ЭДС контактов подключения компенсируют друг друга, так как контакты состоят из одинаковых материалов и находятся при одинаковой температуре. К сожалению, этот способ не всегда удобен на практике.

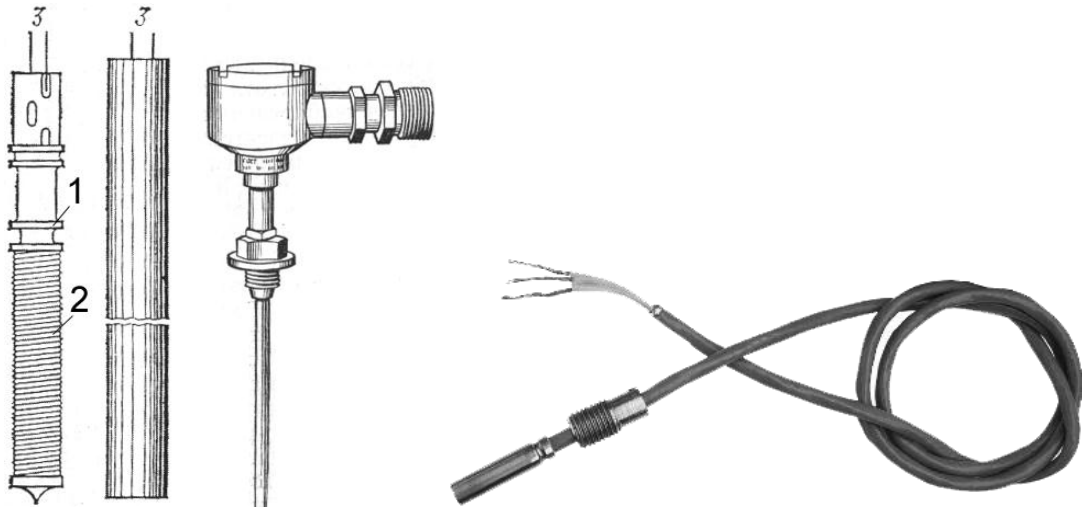
В промышленных системах автоматизации широко используется техника «компенсации холодного спая». Этот метод заключается в том, что температура холодного спая измеряется другим датчиком температуры, а затем величина термо-ЭДС холодного спая программно или аппаратно вычитается из сигнала термопары (рисунок 30 *б*). Как показано на рисунке, места подключения термопары к измерительной системе должны иметь одинаковую температуру, то есть находиться в изотермальной зоне. Кроме того, в схеме с компенсацией холодного спая в этой же зоне должен находиться и датчик температуры холодного спая.

Кроме металлических термопар есть и полупроводниковые термопары. Если для металлов значения термо-ЭДС составляют всего 0,006–0,06 мВ/град., то для полупроводниковых термопар они доходят до 0,1–1,0 мВ/град., то есть превосходят первые в десятки раз.

2.3. Терморезисторы сопротивления

К датчикам, использующим зависимость электрического сопротивления первичных преобразователей (металлов и полупроводников) от температуры, относятся *термометры сопротивления (терморезисторы)*. Их широко применяют для измерения температур в пределах от –200 до +650^0 С. Обладая теми же достоинствами, что и термопары, они, кроме того, позволяют получить на выходе большую мощность и хорошо согласуются со вторичными приборами.

У *металлических терморезисторов* (рисунок 31 *а*) проволока 2, изготавливаемая из чистых металлов (медь, никель, платина), намотана на изоляционный каркас 1. Выводы 3 закреплены к изоляционной колодке. Намотку термометров выполняют в основном безиндукционным (бифилярным) способом, при которм используюся две близко расположенных параллельных обмотки. Каркасы затем заливают эпоксидной смолой (рисунок 31 *б*) или помещают в защитные от механических повреждений корпуса (рисунок 31 *в, г*).



а) *б)* *в)* *г)*

а – внутрення часть; *б* – защитный кожух; *в, г* – внешний вид

Рисунок 31 – Конструкции металлических терморезисторов

Сопротивление проволоки (Ом) следующим образом зависит от температуры:

$R = R_0 [1 + \alpha (\theta - \theta_0)]$,

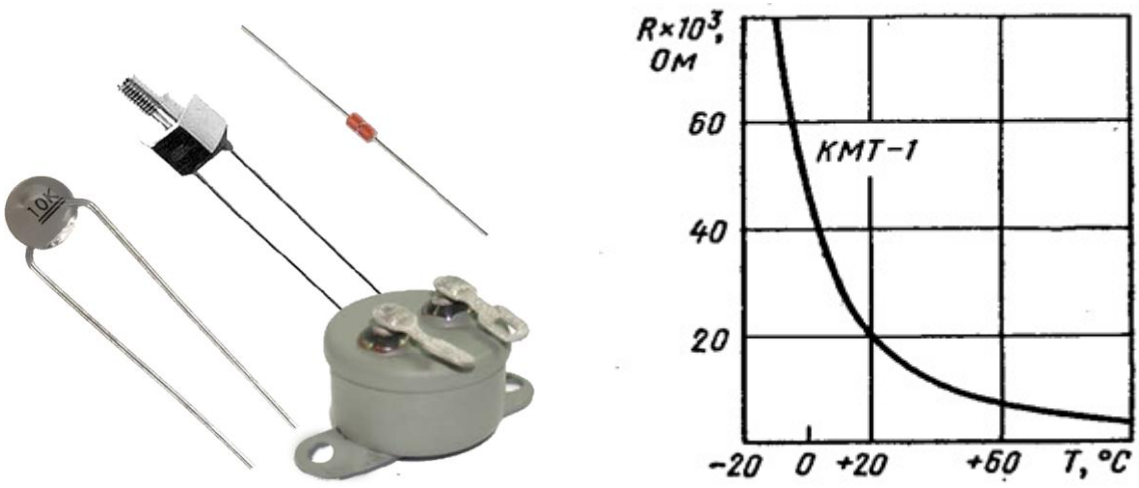
где R_0 – сопротивление проволоки при температуре θ_0;

R – сопротивление проволоки при температуре θ;

α – температурный коэффициент сопротивления (для металлов (3,7–6,5) 10^{-3} 1/град).

Серийно выпускаются платиновые термометры сопротивления (ТСП) для измерения температуры от –220 до +1100 ^{0}С, медные (ТСМ) для измерения температур от –200 до +200 ^{0}С и никелевые (ТСН) для измерения температур от –60 до +180 ^{0}С. Достоинством металлических датчиков является высокая линейность и взаимозаменяемость, т.е. возможность замены вышедшего из строя датчика на аналогичный без повторной калибровки системы. Взаимозаменяемость достигается благодаря малому технологическому разбросу сопротивлений датчиков (разброс сопротивлений составляет от ±0,15 °С при температуре 0 °С для медных датчиков класса «А» до ±0,5 °С для датчиков класса «С».

Наряду с металлическими терморезисторами большое распространение получили *полупроводниковые терморезисторы* (ПТР) (рисунок 32). Эти терморезисторы применяются для дистанционного измерения температуры, как воспринимающие органы в системах автоматики и телемеханики, а также в качестве термокомпенсаторов, стабилизаторов напряжения, ограничителей пускового тока, датчиков уровня жидкости и сыпучих материалов.



а) *б)*

а – варианты конструкции; *б* – температурная характеристика термистора КМТ-1

Рисунок 32 – Полупроводниковые термисторы

Полупроводниковые терморезисторы делятся на две группы: с отрицательным и положительным температурным коэффициентом сопротивления. Первые получили название *термисторов (*NTC), а вторые – *позисторов* (PTC).

Большинство термисторов – керамические полупроводники, изготовленные из гранулированных оксидов и нитридов металлов путем формирования сложной многофазной структуры с последующим спеканием на воздухе при 1100–1300 °С. Сопротивление (номинальное) этих терморезисторов составляет от 1,0 Ом до 1,0 мОм (при 20 ^{0}С) с отклонением от

номинала не более 20%. У полупроводниковых терморезисторов сопротивление больше зависит от температуры, чем у металлических.

Уравнение температурной характеристики термисторов имеет вид:

$$R_\theta = R_н e^{\frac{B}{\theta} - \frac{B}{\theta_0}},$$

где θ – температура, К;

θ_0 – температура при 293 К (20 ^{0}С);

$R_н$ – сопротивление при θ_0 = 293 К (указывается в паспорте термистора);

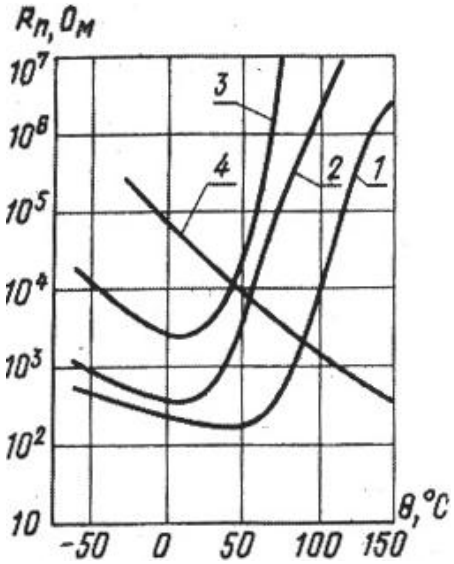
В – константа, определяемая как:

$$B = \frac{\theta_1 \theta_2}{\theta_2 - \theta_1} \ell n \frac{R_1}{R_2},$$

где R_1 и R_2 – сопротивление термистора при температурах θ_1 и θ_2.

Зависимость сопротивления термистора от температуры, соответствующая приведенному выше уравнению, иллюстрируется графиком, показанном на рисунке 32 *б*.

Позисторы изготавливаются из титана бария со специально подобранными примесями, которые придают ему свойства полупроводника с резкой зависимостью сопротивления от температуры (рисунок 33).



1 – позистора СТ6-1А; 2 – позистора СТ6-1Б; 3 – позистора СТ6-3Б;
4 – характеристика термистора КМТ-4 приведена для сравнения

Рисунок 33 – Температурные характеристики позисторов

Температурный коэффициент позисторов в 3–4 раза больше, чем у термисторов, а постоянная времени их в 5–6 раз меньше.

Серийно выпускаемые ПТР могут работать при температурах от 40 до 180 ^{0}С при давлениях до 10^6 Н/м^2 и относительной влажности до 70%.

Характеристики ПТР относительно стабильны. Срок службы при нормальных режимах работы практически неограничен. Минимально допускаемая мощность рассеивания ПТР составляет для различных типов от 5 до 800 мВт.

Основным недостатком полупроводниковых датчиков температуры, ограничивающих их применение в автоматизации технологических процессов, является разброс параметров однотипных изделий, что делает невозможным замену датчика без последующей калибровки измерительной цепи для обеспечения высоких метрологических показателей.

3 ПРОГРАММА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1 Программа выполнения работы

1. Изучить принципы действия и конструкции датчиков температуры.
2. Снять температурную характеристику терморезистора $R_\theta = f(\theta)$.
3. Протарировать мост для измерения температуры при помощи терморезистора по показаниям миллиамперметра, включенного в измерительную диагональ моста $I_g = f(\theta)$.

3.2 Порядок выполнения работы

1. Изучить принципы действия и конструкции устройств, представленных на стенде.
2. Собрать мостовую схему (рисунок 34) для снятия температурной характеристики полупроводникового терморезистора $R_\theta = f(\theta)$ и тарировочной зависимости $I = f(\theta)$. После этого:
   - подать на мостовую схему напряжение питания U от стабилизированного источника постоянного тока не более 30 В;
   - с помощью переменного резистора R (магазина сопротивлений) сбалансировать мост по миллиамперметру PA1;

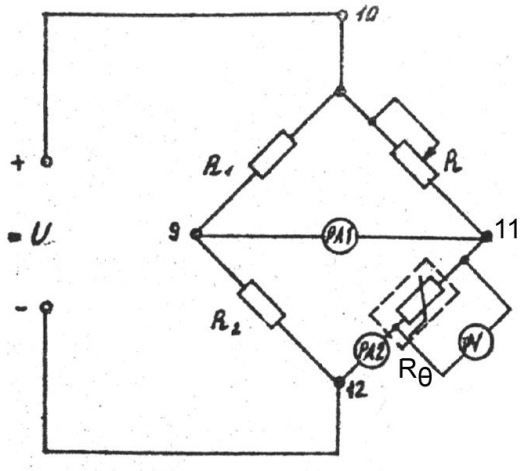


Рисунок 34 – Схема для снятия температурной характеристики термистора и тарировки (градуировки) моста

- записать значение начальной температуры внутри термического шкафа и показания измерительных приборов PA1, PA2, и PV;
- подать электропитание на термический шкаф и в синхронном режиме (одновременно) фиксировать и записывать в таблицу показания термометра, приборов PA1, PA2 и PV при изменениях температуры на 5 ^{0}C в пределах от начальной температуры до 95–100 ^{0}C;
- по закону Ома, используя результаты измерений, полученные с помощью приборов PA2 и PV, определить значения сопротивления полупроводникового терморезистора при различных температурах (таблица 2);

3. По результатам эксперимента (таблица 2):
   - построить температурную характеристику полупроводникового терморезистора $R\theta = f(\theta)$ (температура в градусах Кельвина);
   - определить константу B и построить расчетную температурную характеристику терморезистора;
   - построить тарировочную характеристику мостовой схемы и с ее помощью определить коэффициент передачи исследуемой измерительной схемы температуры.

Таблица 2 – Экспериментальные данные при исследовании термистора

θ, К (показания термометра)							
I, мА (показания PA1)							
R_θ, Ом (вычислить)							
$I_т$, мА (показания PA2)							
$U_т$, В (показания PV)							

4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать схему испытаний терморезистора, результаты в виде таблицы и графических зависимостей согласно п. 3 и выводы по работе.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите типы датчиков температуры, сравните их по преимуществам и недостаткам.
2. Каков принцип работы жидкостных датчиков температуры? Приведите способы преобразования перемещения столба жидкости в электрический сигнал.
3. Каков принцип работы манометрических датчиков температуры?
4. Каков принцип работы биметаллических и дилатометрических датчиков и реле температуры?
5. Каков принцип работы термоэлектрических датчиков температуры (термопар)?
6. Каков принцип работы металлических терморезисторов?

7. Что такое термистор и позистор и каковы их отличия?
8. Почему в промышленной автоматизации в качестве датчиков температуры примущественно используют термопары и металлические термометры сопротивления?

Лабораторная работа № 4
ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение принципа действия, назначения, исследование влияния нагрузки на погрешность и чувствительность потенциометрических датчиков.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Потенциометрические датчики (преобразователи) (рисунки 35, 36) предназначены для измерения линейных и угловых перемещений различных подвижных объектов. Они также используются в следящих системах для сравнения входных и выходных величин, а в исполнительных механизмах в качестве реохорда обратной связи.

Конструктивно-потенциометрические датчики состоят из прямого или кольцевого каркаса, обмотки из высокоомной проволоки (манганина, константана, изобелина, никилина) и движка – подвижного контакта. Существуют также непроволочные (пленочные) потенциометрические датчики, в которых функцию обмотки выполняет пленка из благородного металла – радия, нанесенная на стекло.



Рисунок 35 – Потенциометрические датчики

Если движок потенциометрического датчика связать с каким-либо первичным чувствительным элементом (мембраной, сильфоном и т.п.), то входной величиной может быть усилие, давление, уровень жидкой или сыпучей среды и т.п.

Достоинством потенциометрических датчиков является их простота, а недостатком – низкая надежность работы из-за наличия скользящих электрических контактов.

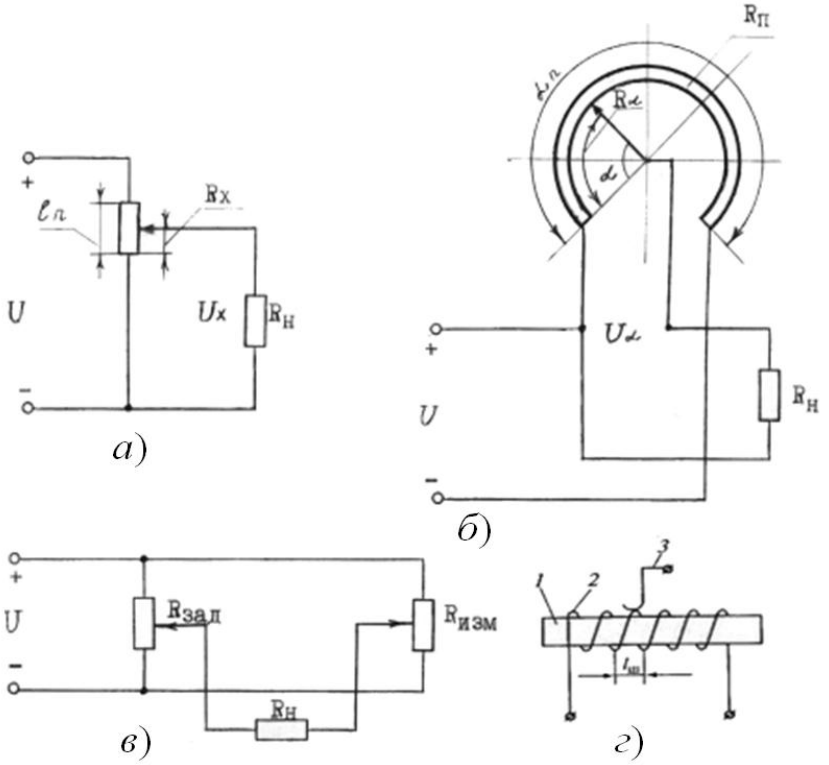
Потенциометрические датчики имеют однозначную функциональную зависимость между значением сопротивления и перемещения. Для датчиков, измеряющих линейные перемещения, эта зависимость имеет вид:

$$R_x = \frac{R_n}{l_d} X ,$$

где R_n – полное сопротивление датчика, Ом;

l_d – полная длина намотки проволочного сопротивления, мм;

X – линейное перемещение подвижного контакта, мм.



а, б – для измерения линейных и угловых перемещений; *в* – в следящих системах ($R_{зад}$, $R_{изм}$ – соответственно задающий и измерительный датчик; $R_н$ – сопротивление нагрузки); *г* – потенциометрический датчик для измерения линейных перемещений (1 – каркас; 2 – провод; 3 – токосъемный контакт)

Рисунок 36 – Схема включения потенциометрических датчиков

Для датчиков, измеряющих угловые перемещения, функциональная зависимость сопротивления от угла перемещения имеет вид:

$$R_\alpha = \frac{R_n}{\alpha_n}\alpha,$$

где α_n – полный угол поворота подвижного контакта, рад;

α – угловое перемещение подвижного контакта, соответствующее измеряемому перемещению, рад.

Статические характеристики для ненагруженных датчиков ($R_н = \infty$) имеют следующий вид:

- для датчиков линейных перемещений:

$$U_x = \frac{U_n}{R_n}R_x = \frac{U_n}{l_n}X,$$

где U_n – напряжение источника питания;

– для датчиков угловых перемещений:

$$U_\alpha = \frac{U_n}{R_n} R_\alpha = \frac{U_n}{\alpha_n} \alpha .$$

В процессе работы потенциометрические датчики могут иметь на выходе нагрузку с различным сопротивлением ($R_н \neq \infty$), которая вызывает ток нагрузки. Это приводит к снижению выходного напряжения, появлению погрешности и снижению чувствительности датчика.

Максимальная абсолютная погрешность при наличии нагрузки ($R_н \neq \infty$) применительно к датчику угловых перемещений определяется следующим выражением:

$$\left|\Delta U_\alpha\right|_{max} = 0,15 \frac{R_n}{R_н} U_n ,$$

где ΔU_α – погрешность датчика угловых перемещений;

$R_н$ – сопротивление нагрузки, Ом.

Погрешность потенциометрических датчиков, вызываемая нагрузкой, может быть устранена посредством включения на его выходе усилителя с большим входным сопротивлением и стабильным коэффициентом усиления.

Коэффициент передачи потенциометрических датчиков аналитически определяются как:

$$k_x = \frac{dU_x}{dX}, \quad k_\alpha = \frac{dU_\alpha}{d\alpha} .$$

Их также можно находить на основе экспериментально снятых статических характеристик. Так, например, для датчика угловых перемещений (рисунок 37)

$$k_\alpha = \frac{\Delta U}{\Delta \alpha} ,$$

где $\Delta\alpha$ *и* ΔU – малые приращения соответственно угла поворота и выходного напряжения датчика.

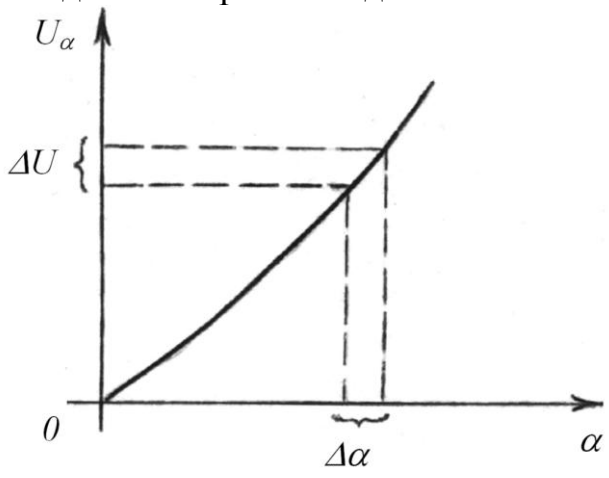
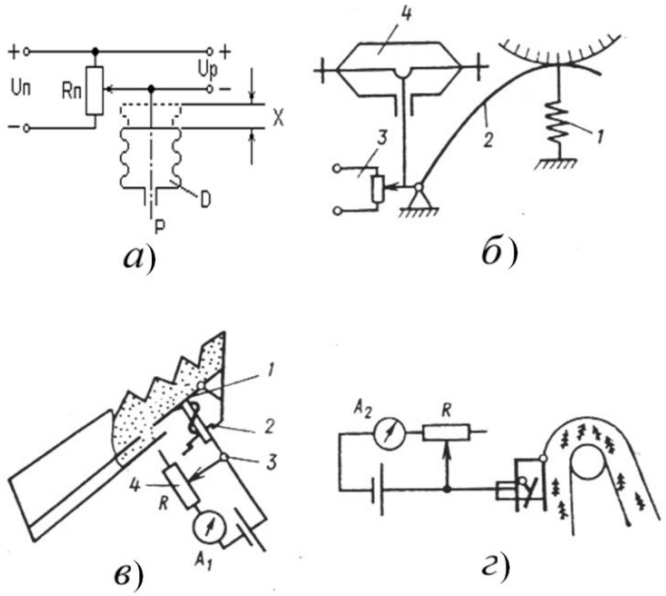


Рисунок 37 – Графическое определение коэффициента передачи по экспериментальной статической характеристике

Примеры практического использования потенциометрических датчиков в системах автоматического контроля и управления приведены на рисунке 38.



а – для контроля перемещения X сильфонного датчика D контроля давления P; *б* – в САУ направленным движением комбайна; *в, г* – в системе автоматического контроля потерь зерна комбайна

Рисунок 38 – Примеры применения потенциометрических датчиков

Схема (рисунок 38 *а*) используется для преобразования давления P, измеряемого с помощью сильфонного датчика в электрический сигнал – напряжения U_p.

В системе автовождения комбайна механический контактный щуп 2 (рисунок 38 *б*), выполненный в виде флюгер-копира, закрепляется на левом полевом делителе и прижимается к бровке не скошенного хлеба пружиной 1. Отклонения копира с помощью потенциометра 3 преобразуются в электрический сигнал. Демпфер 4 служит для гашения высокочастотных колебаний флюгера.

Известна схема использования потенциометрических преобразователей для определения потерь зерна комбайном (рисунок 38 *в*). К корпусу одной из клавиш соломотряса на конечном его участке шарнирно прикреплена плоская пластина 1, которая опирается на пружину 2 и соединяется рычажной передачей 3 с движком реостата 4. Отклонение пластины и соответствующее перемещение движка потенциометрического датчика зависят от количества зерна, находящегося на этой пластине.

Такое же устройство (рисунок 38 *г*) размещено в верхней головке колосового элеватора и служит для определения потерь зерна недомолотом.

3 ПРОГРАММА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

1. Изучить общий принцип работы потенциометрических датчиков и примеры их применения.
2. Собрать схему, приведенную на рисунке 39. Лабораторная установка выполнена в виде переносного малогабаритного прибора. На передней панели прибора (рисунок 40) смонтированы вольтметр, коммутационные устройства, клеммы, к которым подключены выводы потенциометрических датчиков, резисторов, источника питания. Все элементы смонтированы внутри прибора. Ручка управления потенциометрического датчика $R_{п1}$ выведена на заднюю стенку прибора. Подвижный контакт датчика $R_{п1}$ вращается в круговую (не имеет механического ограничителя), а подвижные контакты многооборотных датчиков $R_{п2}$, $R_{п3}$ имеют ограничители. В связи с этим при вращении их ручек управления необходимо прикладывать малые усилия во избежание поломки механических ограничителей и подвижных контактов.

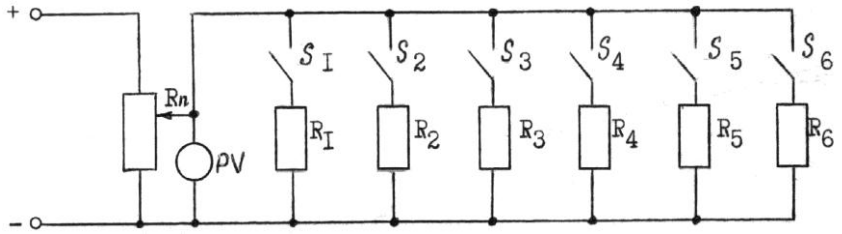
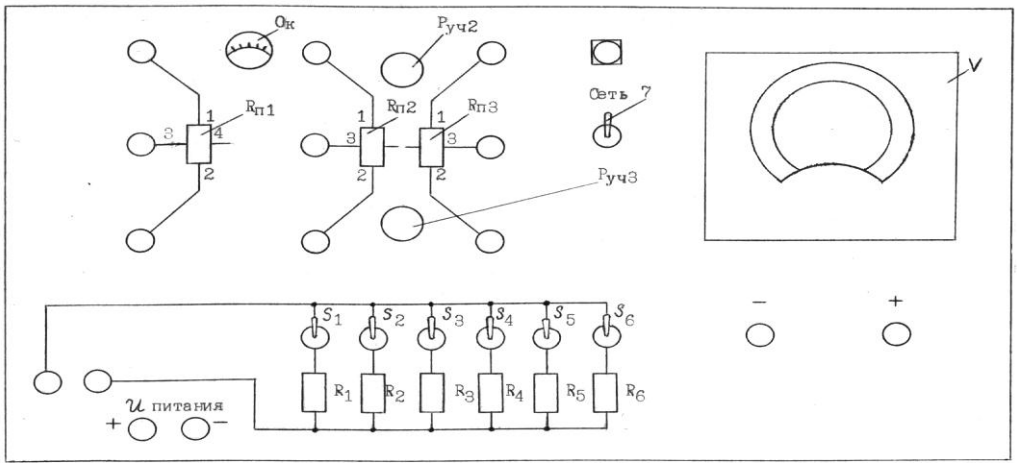


Рисунок 39 – Схема испытания потенциометрических датчиков



$R_{п1}$ – потенциометрический датчик угловых перемещений от 0 до 360^0; $R_{п2}$, $R_{п3}$ – многооборотный потенциометрический датчик угловых перемещений; R_1–R_6 – резисторы для нагрузки датчиков; V – вольтметр; S_1–S_7 – тумблеры; Ок – окно для визуального контроля угловых перемещений датчика $R_{п1}$; $P_{уч2}$, $P_{уч3}$ – ручки перемещения подвижных контактов датчиков $R_{п2}$ и $R_{п3}$

Рисунок 40 – Схема передней панели лабораторной установки

3. Снять зависимости $U_\alpha = f(\alpha)$ для ненагруженных и нагруженных датчиков при различных значениях сопротивлений нагрузки $R_н = const$.
4. Построить графики $U_\alpha = f(\alpha)$ и определить значения максимальных погрешностей аналитически и графически при различных $R_н = const$. Построить графики зависимости максимальной погрешности датчиков от сопротивления нагрузки $R_н$.
5. По графическим зависимостям $U_\alpha = f(\alpha)$ построить графики, отображающие функциональную связь коэффициента передачи датчиков k_α от сопротивления нагрузки $R_н$, при фиксированном значении угла α, т.е. $k_\alpha = f(R_н)$ при $\alpha = const$.

4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать схему испытания потенциометрических датчиков, результаты испытания в виде таблиц, графические зависимости согласно п. 3 и выводы по работе.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение потенциометрических датчиков в системах автоматики?
2. Как устроен потенциометрический датчик для измерения линейных перемещений?
3. Как устроен потенциометрический датчик для измерения угловых перемещений?
4. Каковы достоинства и недостатки потенциометрических датчиков?
5. Что такое погрешность потенциометрических датчиков и как ее можно устранить?
6. Что такое коэффициент передачи потенциометрических датчиков и как его определить аналитически и графически?

Лабораторная работа № 5
ДАТЧИКИ УСИЛИЯ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение назначения, принципа действия датчиков усилий; экспериментальное исследование тензорезистивных датчиков.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Датчики усилия (или датчики силы) — это устройства, предназначенные для преобразования механического воздействия, которое может быть приложено с упругому телу в виде растяжения, сжатия, изгиба или кручения в электрический сигнал. Датчики усилия широко используются в различных отраслях промышленности и в быту благодаря своей точности и надёжности. В зависимости от конструкции упругого элемента, деформации в котором вызывают приложенные усилия, датчики усилий позволяют измерять вес, изгибающий и крутящий моменты. Такие датчики могут применяться как для измерения статических величин, так и динамических, что связано с величиной инерционности как самого датчика, так и схемы преобразования, усиления и передачи выходного сигнала.

2.1. Тензорезисторы

Принцип действия тензорезисторов основан на явлении тензоэффекта – способности некоторых материалов менять электрическое сопротивление при деформировании (сжатии, скручивании, растяжении). Тензорезисторы изготавливают из различных материалов, обладающих тензоэффектом:

- *проволочные* тензорезисторы изготавливают из металлической проволоки диаметром 10–30 мкм;
- *фольговые* тензорезисторы изготавлиают из металлической фольги толщиной 4–12 мкм;
- *полупроводниковые* тензорезисторы изготавливают преимущественно из кремния и германия, имеющих сильно выраженный тензоэффект. Иногда материалом служит арсенид галлия и антимонид индия.

В качестве подложки для тензорезисторов обычно используют ткань, бумагу, полимерную плёнку, слюду и другие материалы. Основная характеристика тензорезисторов – коэффициент тензочувствительности k, определяемый как отношение изменения сопротивления $\Delta R/R$ к изменению деформации $\Delta l/l$. У большинства проволочных тензорезисторов $k \approx 2$, а у полупроводниковых $k \approx 100$.

Проволочный тензорезистор (рисунок 41) представляет собой плоскую петлеобразную проволочную обмотку (решетку) прямоугольной формы, к концу которой припаяны или приварены относительно толстые

выводы из медной луженой проволоки или фольги. Проволочная решетка с помощью специального клея закрепляется на тонкой прямоугольной полоске из бумаги, клеевой или лаковой пленки, служащей основой (подложкой). Наиболее подходящими материалами для изготовления тензочувствительной проволоки являются медно-никелевые сплавы (константан, адванс), нихромы и никель-хромомолибденовые сплавы (элинвар).

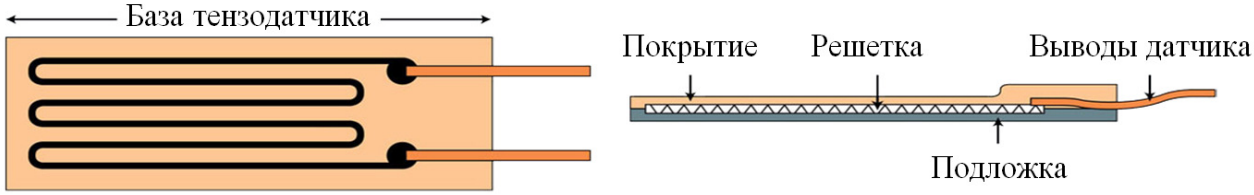
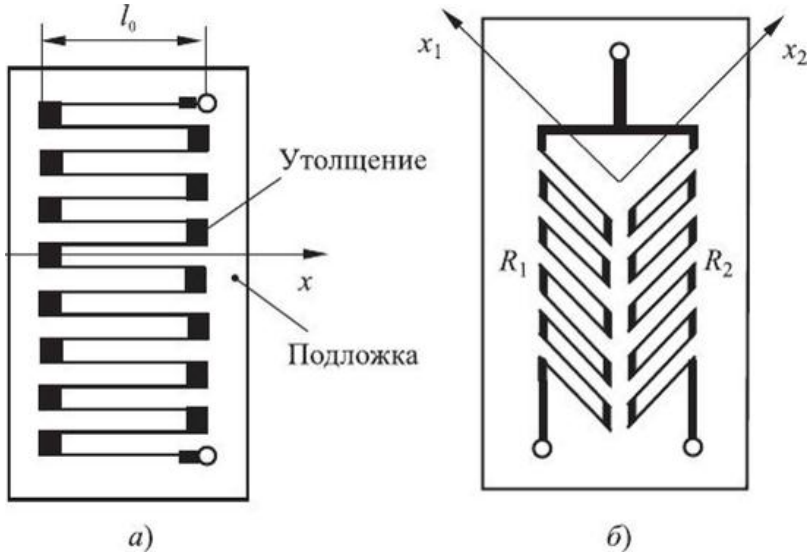


Рисунок 41 – Устройство простейшего проволочного тензорезистора

Фольговые тензорезисторы представляют собой тонкую ленту из высокоомной фольги, на которой часть металла выбрана травлением таким образом, что оставшаяся его часть образует решетку с выводами (рисунок 42).



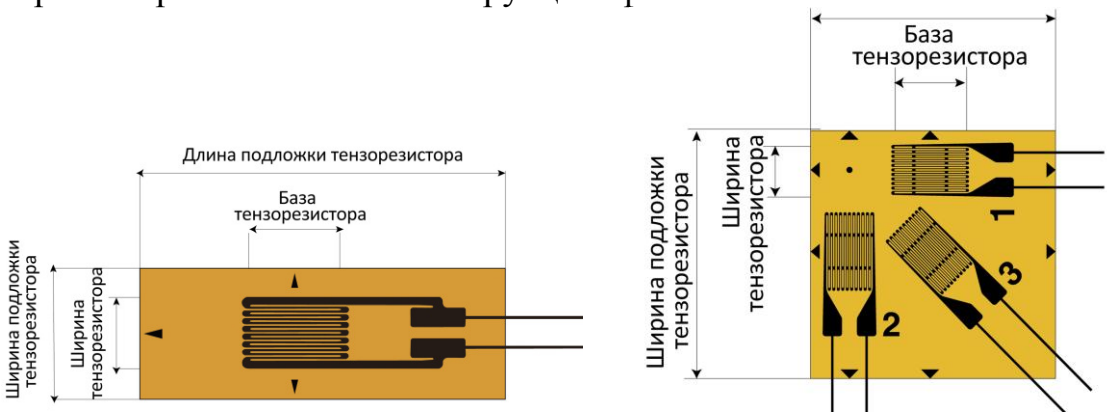
а – однокоординатный датчик; *б* – двухкоординатный датчик

Рисунок 42 – Фольговые тензорезисторы

Для уменьшения поперечной тензочувствительности в конструкции фольговых тензодатчиков делаются утолщения (рисунок 42, а), при этом поперечная тензочувствительность обычно не превышает 0,1+0,2% от продольной. Фольговые тензодатчики по сравнению с проволочными имеют большее отношение площади поверхности чувствительного элемента к площади поперечного сечения (чувствительность) и более стабильны при критических температурах и длительных нагрузках. Большая площадь поверхности и малое поперечное сечение также обеспечивает хороший температурный контакт чувствительного элемента с образцом, что уменьшает саморазогрев датчика. На рисунке 42, б показан тензодатчик с двумя тензорезисторами R_1 и R_2 одинакового номинала, но ось x_1

максимальной чувствительности резистора R_1 ортогональна оси x_2 максимальной чувствительности резистора R_2. Анализиируя величины сопротивлений между тензорезисторами, можно судить о деформации плоскости упругого элемента, на который наклеен такой тензорезистор, в любом направлении.

Полупроводниковые тензорезисторы (рисунок 43) – это пластины из полупроводникового материала, к концам которой специальным методом крепят выводные проводники. Конструкция полупроводниковых тензорезисторов похожа на конструкцию фольговых.



а) б)

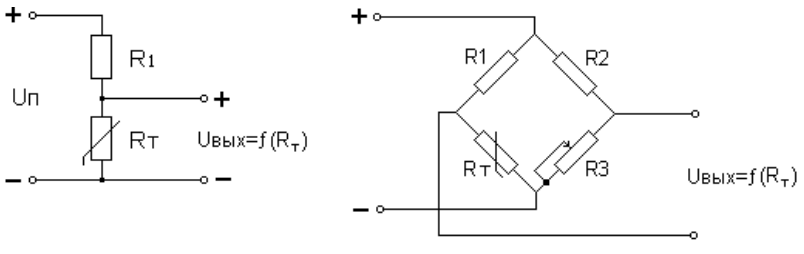
а – однокоординатный датчик; *б* – двухкоординатный датчик

Рисунок 43 – Полупроводниковые тензорезисторы

К существенным достоинствам полупроводниковых тензорезисторов относятся:

- меньшие размеры, чем у проволочных;
- значительно большая чувствительность по сравнению с металлическими;
- в связи с более высокой чувствительностью упрощается схема преобразователя величины сопротивления в электрический сигнал.

Однако полупроводниковые тензорезисторы в значительной степени подвержены влиянию температуры, а также их характеристика нелинейна, что ограничивает область применения.



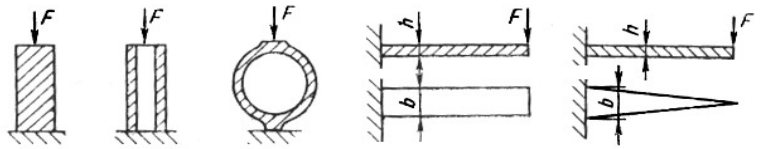
а) б)

а – потенциометрическая схема; б – мостовая схема.

Рисунок 44 – Схемы включения тензорезисторов

В измерительные схемы тензорезисторы включают либо по потенциометрической, либо по мостовой схеме (рисунок 44). Потенциометрическая схема представляет собой делитель напряжения, в котором при изменении сопротивления тензорезистора R_T при неизменой величине напряжения питания и R_1 и напряжение на выходе зависит от деформации в месте расположения датчика. В схеме рисунок 44, б вначале балансируется мост при отсутствии деформации при помощи переменного резистора *R3,* при этом напряжение на выходе моста становится равным 0. Это состояние моста называется равновесным, при котором выполняется условие $R_T/R1=R3/R2$. Преимуществом измерительного моста над потенциометрической схемой является более высокая точность измерений, возможность компенсации погрешностей и меньшая зависимость от нестабильности источника питания. Измерительный мост позволяет сравнивать измеряемое сопротивление с эталонным, что минимизирует влияние внешних факторов, таких как температура или нестабильность напряжения.

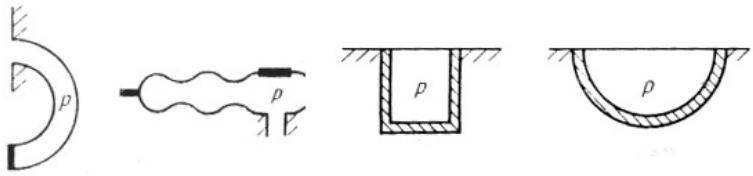
Тензорезисторы любого типа и любой конструкции в датчиках силы, момента и давления приклеиваются специальным клеем к упругим элементам, которые могут иметь различную конфигурацию. В датчиках силы упругие элементы могут быть выполнены в виде сплошных и полых стержней (рисунок 45, а, б), колец (рисунок 45, в), балок равного сечения и равного сопротивления (рисунок 45, г, д).



а) б) в) г) д)

а, б – сплошной и полый стержень; в – кольцо;
г, д – балка равного сечения и равного сопротивления
Рисунок 45 – Упругие элементы датчиков силы

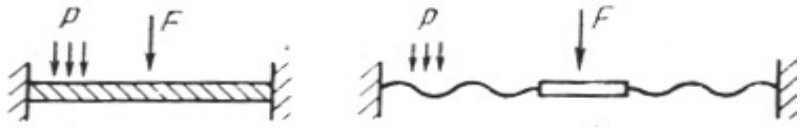
В датчиках давления в качестве упругих элементов используются манометрические трубки (трубки Бурдона), мембранные коробки, колпачки, полусферы (рисунок 46).



а) б) в) г)

а – манометрическая трубка; б – мембранная коробка;
в – колпачок; г – полусфера
Рисунок 46 –Упругие элементы датчиков давления

Для упругих элементов – плоских и гофрированных мембран (рисунок 47), измеряемой величиной может быть как сила, так и давление.



а) б)

Рисунок 47 – Упругие элементы, в виде плоской (а) и гофрированной (б) мембраны

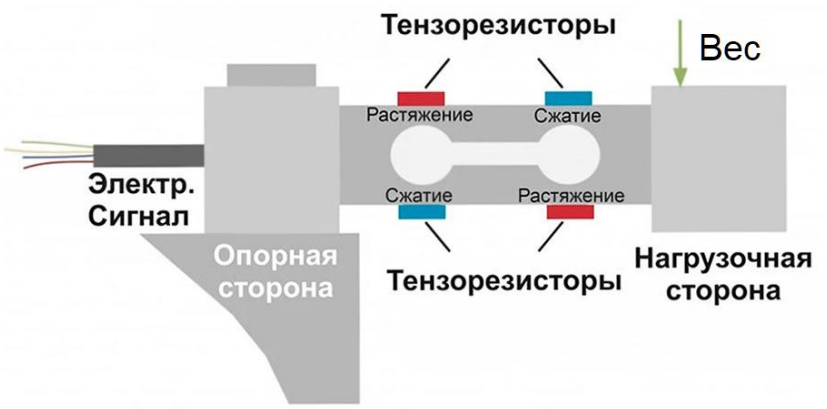


Рисунок 48 – Пример промышленной конструкции тензорезистивного датчика измерения веса на основе мостовой схемы

На рисунке 48 в качестве примера изображен датчик веса, в которм наклеенные на него два тензорезистора работают на растяжение, а два других – на сжатие. При действии силы на датчик, он подвергается деформации, после чего при прекращении силы восстанавливает свою первоначальную форму. Измерительный элемент тензодатчика спроектирован таким образом, чтобы деформация сосредотачивалась в определенной области, что облегчает регистрацию изменений.

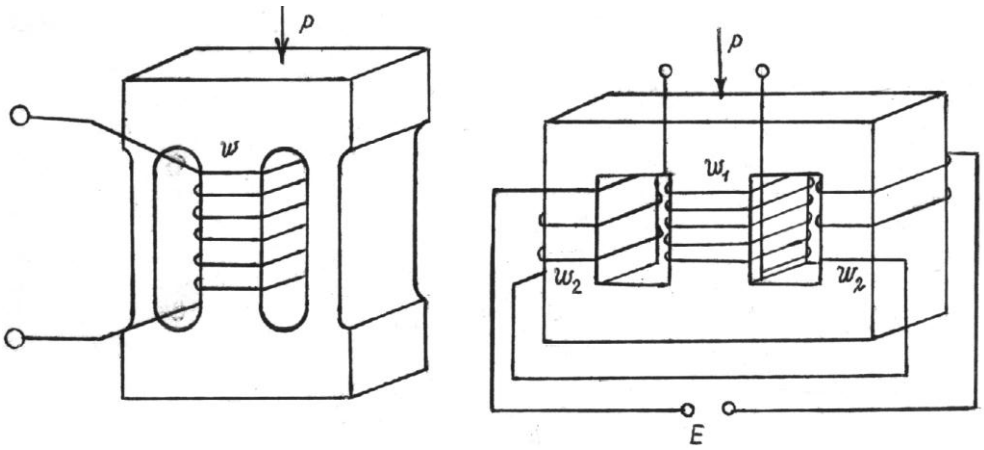
Электрические сигналы тензорезистивных датчиков малы как по уровню, так и по мощности. Для их усиления используются электронные усилители, а в современных устройствах также и аналогово-цифровые преобразователи. Для устранения влияния помех схема первичного преобразования сопротивления в выходной сигнал размещается непосредственно в корпусе датчика.

Следует отметить, что тензорезисторы применяются не только в датчиках силы и давления, но и для исследования механических напряжений в деталях и узлах машин и механизмов. В таких случаях тензорезисторы непосредственно наклеиваются на исследуемый объект. Если исследуемый объект вращающийся (например вал), то для электрического питания измерительной схемы и съема сигнала используются специаль-

ные токосъемные кольца или беспроводные интрефейсы передачи сигналов.

2.2. Магнитоупругие датчики

Конструктивно магнитоупругие датчики выполняются в виде ферромагнитного сердечника, на который намотана одна (рисунок 49,а) или несколько обмоток (рисунок 49, б). В первом случае магнитоупругий датчик дроссельного типа, во втором – трансформаторного. Датчики питаются переменным током. Сердечники датчиков изготавливаются из ферромагнитных материалов, обладающих магнитострикционными свойствами (никель, кобальт, пермалой, электротехническая сталь и др).



а) б)

Рисунок 49 – Магнитоупругие датчики

Принцип действия магнитоупругих датчиков основан на изменении магнитной проницаемости μ ферромагнитных тел в зависимости от возникших в них механических напряжений σ (магнитоупругий эффект), обусловленный воздействием на ферромагнитные тела механических сил (растягивающих, сжимающих, изгибающих, скручивающих). На физическом уровне эти явления объясняются изменением положения атомов в кристаллической решетке при воздействии внешнего магнитного поля или прикладываемой силы.

Таким образом, в магнитоупругом датчике имеет место следующая цепь преобразования физических величин:

для дроссельного датчика

$F \to \sigma \to \mu \to Z \to I;$

для трансформаторного датчика

$F \to \sigma \to \mu \to E,$

где F – сила;

σ – механическое напряжение;

μ – магнитная проницаемость;

Z – полное сопротивление обмотки;

I – ток обмотки;

E – ЭДС вторичной обмотки трансформаторного датчика.

Полное сопротивление обмотки определяется по формуле:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2},$$

где R, X_L – соответственно активное и индуктивное сопротивление обмотки;

L – индуктивность обмотки;

ω – угловая частота питающего напряжения.

Простейший трансформаторный датчик состоит из двух обмоток, намотанных на сердечник с необходимыми магнитоупругими свойствами, и представляет собой трансформатор, при этом одна из обмоток (первичная) подключается к источнику переменной ЭДС, а другая (вторичная) – к нагрузке. Недостатком простейшего трансформаторного датчика является неравенство нулю выходного напряжения при отсутствии деформации сердечника.

Другая разновидность трансформаторного датчика – шунтовый датчик, в котором на одном стержне сердечника находится первичная обмотка, на другом – вторичная, а средний стержень сердечника не имеет обмотки (шунтовой стержень). Так как путь для магнитного потока через шунтирующий стержень короче, а сечение шунтирующего стержня больше, то магнитный поток от первичной обмотки практически не попадает в стержень со вторичной обмоткой, но при приложении усилия на шунтовой стержень (с положительной магнитострикцией) его магнитная проницаемость уменьшается и поток начинает замыкаться через стержень со вторичной обмоткой, в которой появляется напряжение.

В дифференциально-трансформаторном датчике (рисунок 49, б) первичная обмотка находится на среднем стержне, а на двух боковых стержнях – две вторичные с одинаковыми параметрами. Один из боковых магнитопроводов условно назван чувствительным (так как к нему прикладывается усилие), а другой – компенсационным элементом. Вторичные обмотки намотаны встречно, поэтому на нагрузке (без приложения механического напряжения к датчику) суммарное напряжение равно нулю. При возникновении механического напряжения на одном из стержней баланс нарушается, и на нагрузке появляется электрическое напряжение E.

Трансформаторные магнитоупругие датчики имеют недостаток, заключающийся в том, что приращение ЭДС E вследствие изменения магнитной проницаемости мало по сравнению с начальной ЭДС. Этого недостатка лишен прессдуктор - магнитоупругий датчик особой конструкции магнитопровода (рисунок 50). Датчик выполнен в виде пакета пластин 1 из электротехнической холоднокатанной текстурованной стали (Э320, Э330), стянутых болтами 5. Через четыре диагонально расположенных отверстия намотаны две независимые обмотки. Первичная обмотка 4 (возбуждения) и вторичная 3 (измерительная). При сборке пакета пластины,

штампованные вдоль проката, чередуются с пластинами, штампованными поперек проката. Этим обеспечивается магнитная изотропность датчика в направлениях параллельном и перпендикулярном сжатию. Контролируемое усилие прикладывается к выступу датчика, находящемуся над отверстиями. Эти отверстия вызывают концентрацию механических напряжений, поэтому для предупреждения пластических деформаций среднее значение механического напряжения в чувствительном элементе не должно превышать $(5\text{-}7)10^7$ Н/м^2.

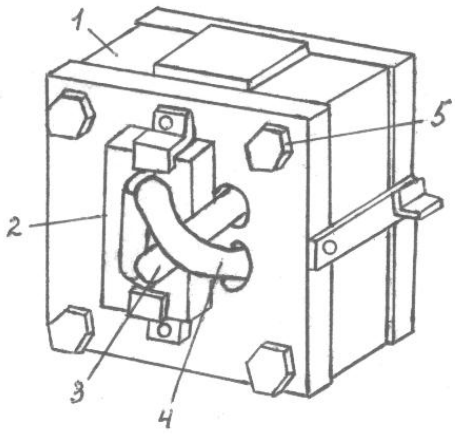
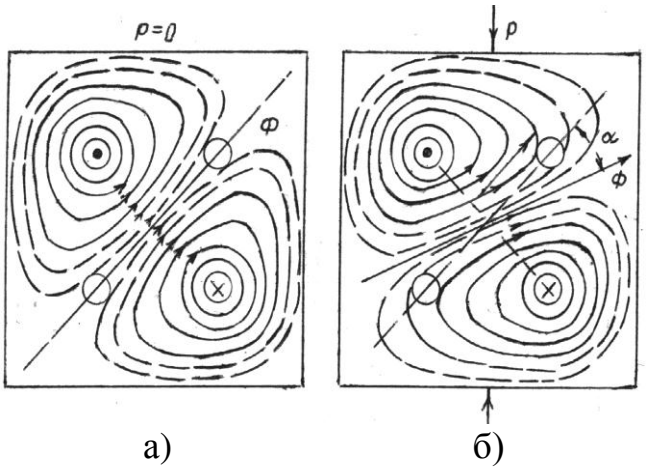


Рисунок 50 – Трансформаторный магнитоупругий датчик (прессдуктор)

Прессдуктор работает следующим образом. В ненагруженном состоянии датчика силовые линии первичной обмотки (рисунок 51, а) располагаются симметрично и не сцепляются со вторичной обмоткой. В результате этого ЭДС вторичной обмотки равна нулю. После приложения силы F вследствие изменения магнитной проницаемости материала магнитное поле вытягивается в направлении большей проницаемости, сжимается в направлении меньшей проницаемости (рисунок 51, б) и, сцепляясь со вторичной обмоткой, индуктирует в ней ЭДС, пропорциональную приложенной силе. При изменении знака нагрузки изменяется фаза выходной ЭДС.



а) б)

Рисунок 51 – Распределение магнитного потока в прессдукторе

Из-за наличия небольшой магнитоанизотропии материала при отсутствии нагрузки существует некоторая ЭДС. Ее можно скомпенсировать посредством балансировочного магнитопровода 2 (рисунок 50) или, при его отсутствии, схемными решениями, например, используя дополнительный источник питания.

К достоинствам магнитоупругих датчиков следует отнести высокую чувствительность и возможность измерения больших усилий (до нескольких тысяч тонн). В то же время магнитоупругие датчики имеют и следующие серьезные недостатки: наличие температурной погрешности, вызванной влиянием температуры окружающей среды на магнитные свойства сердечника; наличие погрешности, вызванной влиянием гистерезиса (как магнитного, так и механического, связанного с остаточной деформацией); наличие погрешности, вызванной колебаниями напряжения питания.

2.3. Пьезоэлектрические и пьезорезонансные датчики усилий

Пьезопреобразователи – электромеханические преобразователи, принцип действия которых основан на пьезоэлектрическом эффекте – явлении возникновения электрической поляризации под действием механических напряжений. Если пьезоэлемент (пьезоэлектрическую пластинку) подвергнуть воздействию механических напряжений (сжатию, растяжению, сдвигу), то на его поверхностях появятся электрические заряды за счет поляризации (прямой пьезоэффект или эффект Кюри). Приложение электрического напряжения к пьезоэлементу вызывает его механическую деформацию (обратный пьезоэффект, эффект Джоуля). Для изготовления пьезопреобразователей используют кварц, турмалин; синтетические кристаллы: сегнетова соль, ниобат лития; поляризованные поликристаллические сегнетоэлектрики, получаемые методами керамического производства (пьезокерамика): титанат бария $BaTiO_3$, цирконат-титанат свинца $PbZrO_3–PbTiO_3$ – пьезокерамика ЦТС.

Пьезоэлектрические датчики используют прямой пьезоэффект и относятся к датчикам генераторного типа. Структурная схема пьезоэлектрического датчика представлена на рисунке 52. Для сбора электрических зарядов к кристаллу на противоположных сторонах прикрепляют электроды. Таким образом, датчик можно считать конденсатором, в котором в качестве диэлектрика выступает сам кристалл, работающий как генератор электрических зарядов, приводящих к появлению электрического напряжения на электродах. Хотя заряд формируется только в местах приложения силы, металлические электроды выравнивают заряды вдоль всей их поверхности, лишая конденсатор избирательности. Однако, если форму электродов усложнить, можно определить точное место приложения внешней силы, детектируя сигналы с конкретных электродов. Наряду с преобразователями, в которых пьезоэлемент работает на сжатие-

растяжение, применяются конструкции, в которых элемент работает на изгиб и сдвиг (рисунок 53).

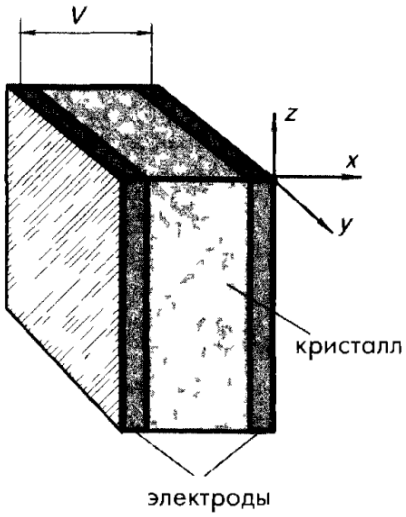
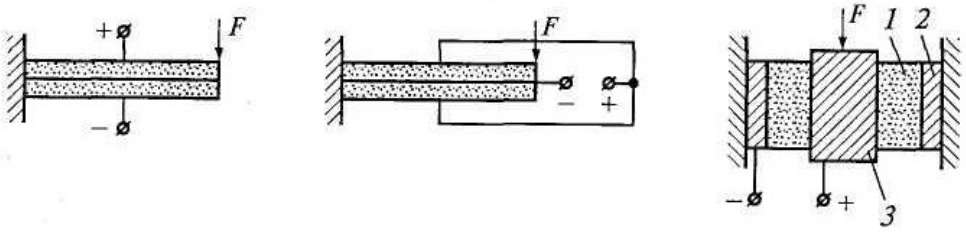


Рисунок 52 – Устройство пьезоэлектрического датчика



а) б) в)

а, б – работа на изгиб (а – суммирование напряжений, б – суммирование зарядов), в – работа на сдвиг (1 – кольцо, 2 – внешний электрод, 3 – внутренний электрод)

Рисунок 53 – Работа пьезодатчиков на изгиб или сдвиг

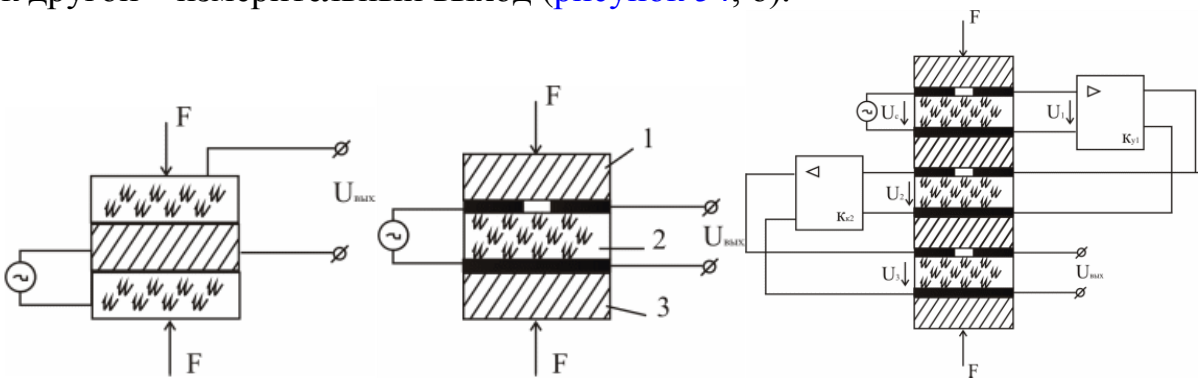
Преобразователь, работающий на изгиб, представляет собой две одинаковые пластины, склеенные между собой. Между ними располагается металлическая фольга. При изгибе такого элемента одна пластина удлиняется, а другая укорачивается. В зависимости от схемы подключения обкладок можно получить либо сумму напряжений (рисунок 53, а), либо сумму зарядов (рисунок 53, б). Преобразователь, работающий на сдвиг, представляет собой кольцо из керамики 1 (рисунок 53, в), в которое вклеен внутренний электрод 3 и которое само вклеено во внешний электрод 2. Под действием силы F происходит деформация сдвига плоскостей, параллельных направлению поляризации. Достоинством такого преобразователя является отсутствие зарядов на электродах при боковых воздействиях на датчик. ***Пьезоэлектрические датчики реагируют только на динамические усилия, вызывающие изменение напряжения в чувствительном элементе***.

Пьезорезонансные датчики основаны на явлении резонанса пьезоэлектрического материала. При подаче переменного электрического напряжения пьезоэлемент начинает колебаться на своей резонансной ча-

стоте. Изменение массы, плотности или других параметров среды, контактирующей с датчиком, влияет на резонансную частоту, что позволяет измерять эти изменения. используют свойства пьезоэлемента менять амплитуду собственных механических колебаний и, соответственно, разность потенциалов на его электродах в зависимости от величины приложенного усилия. ***Пьезорезонансные датчики позволяют измерять статические величины, воздействующие на пьезоэлемент.***

Простейший пьезорезонансный датчик состоит из двух одинаковых пьезоэлементов, соединенных в столбик через токопроводящую заземленную прокладку, причем один из них подключен к генератору электрических синусоидальных сигналов, а другой – к измерительному выходу (рисунок 54, а).

Более совершенными являются пьезорезонансные датчики, использующие пьезоэлектрические трансформаторы с двумя системами электродов, к одной из которых подключен генератор электрических колебаний, а к другой – измерительный выход (рисунок 54, б).



а) б) в)

а – простейший пьезорезонансный датчик; б – пьезоэлектрический трансформатор; в - составной датчик

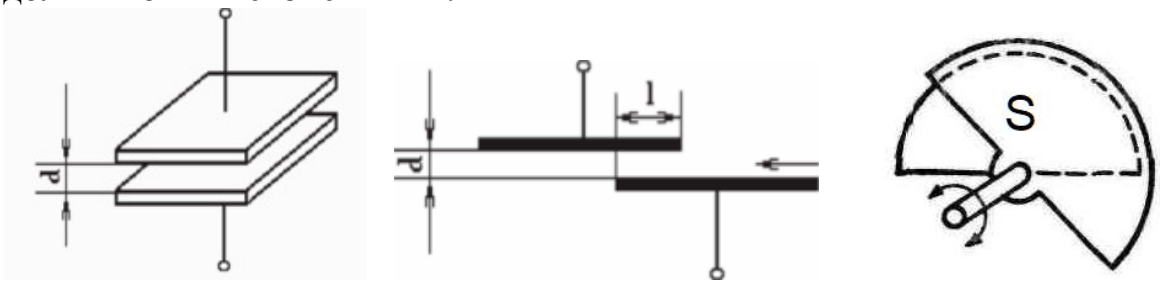
Рисунок 54 – Пьезоэлектрические датчики усилий

Для повышения чувствительности пьезорезонансных датчиков применяют составные преобразователи (рисунок 54, в). Между пьезоэлектрическими трансформаторами, соединенными в столбик помещены демпфирующие прокладки. Трансформаторы соединены каскадно через усилители. Такие датчики применяют для измерения малых усилий.

Достоинства датчиков на основе пьезоэффекта: малые габариты, возможность измерения быстропеременных нагрузок, надежность и простота конструкции. Недостатки различны у различных материалов: у кварца – малая пьезоэлектрическая постоянная, у других – температурная зависимость. Области применения пьезоэлектрических датчиков весьма широки: измерение вибраций, давлений, усилий, сосредоточенных сил, ускорений и т.д..

2.5. Емкостные датчики силы

Принцип работы емкостного датчика основан на изменении электрической емкости конденсатора под действием измеряемого параметра. В общем случае емкость конденсатора определяется тремя величинами: расстоянием *d* между обкладками конденсатора, активной площадью *S* обкладок (т.е. площадью взаимного перекрытия обкладок) и диэлектрической проницаемостью с вещества, находящегося между обкладками *ε*, т.е. *C =f(d, S, ε).* Поэтому емкостный датчик можно использовать для измерения воздействий, под действием которыхй меняется любой из трех перечисленных параметров. При этом два остальных параметра должны быть неизменными.



а) б) в)

а – простейший датчик; б, в –датчики с переменной площадью

Рисунок 55 – Емкостные датчики

Прямое измерение емкости весьма затруднительно, поэтому чаще определяют емкостное сопротивление X_c датчика, связанное с емкостью уравнением:

$$X_{\text{C}} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C},$$

где *f* - частота переменного тока, используемого для питания схемы датчика.

В свою очередь, емкостное сопротивление определяют по величине тока, протекающего через это сопротивление под воздействием приложенного к нему напряжения. Поскольку изменение емкости датчика, как правило, невелико (единицы или сотни пФ), для их питания обычно используются источники тока повышенной (по сравнению с промышленной) частоты - от единиц кГц до десятков МГц.

Для измерения линейных перемещений, а также усилий, напряжений, давления и т.п. наиболее часто используется вариант емкостного датчика, в котором одна из пластин-обкладок неподвижна, а вторая связана с объектом, перемещение которого нужно определить.

Если расстояние *d* между пластинами и диэлектрическую проницаемость ε вещества между ними сохранять неизменными, а в зависимости от углового или линейного перемещения изменять площадь *S* взаимного

перекрытия пластин (обкладок), то также будет изменяться емкость (рисунок 55, б, в).

В качестве измерительных схем обычно применяют дифференциальные датчики, включаемые в мостовую измерительную схему (рисунок 56) На металлическую обкладку 1 действует усилие F. Обкладка закреплена на пружинной подвеске 6. При отсутствии перемещения металлической обкладки 1 под воздействием усилия F она занимает симметричное положение относительно двух неподвижных обкладок 2 и 3, изолированных от корпуса прокладками 4 и 5, и, следовательно, их емкости равны. При наличии усилия F емкости получают приращения разных знаков. Поскольку эти емкости включены в смежные плечи моста, то чувствительность датчика увеличивается вдвое. Питание моста осуществляется от генератора высокой частоты (ГВЧ) величиной нескольких килогерц. Напряжение ΔU зависит от приложенного усилия и его направления (изменяется фаза). Включение емкостного датчика в мостовую схему, питаемую от источника повышенной частоты, позволяет зафиксировать изменения емкости от 0,1%.

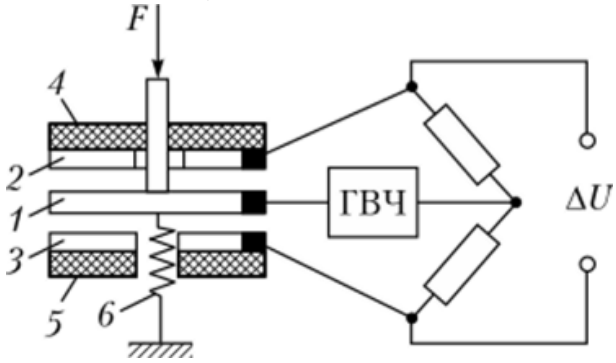


Рисунок 56 – Дифференциальный емкостный датчик

Более высокую чувствительность можно получить в резонансных схемах включения емкостного датчика, показанного на рисунке 57. В этом случае емкостный датчик включается в колебательный контур совместно с индуктивным сопротивлением. Генератор высокой частоты вырабатывает напряжение частотой f_r и питает колебательный контур, состоящий из емкостного датчика $C_Д$, индуктивности $L_к$ и подстроечного конденсатора C_0. Напряжение контура усиливается усилителем $У$ и измеряется милливольтметром, шкала которого может быть проградуирована в единицах измеряемой величины.

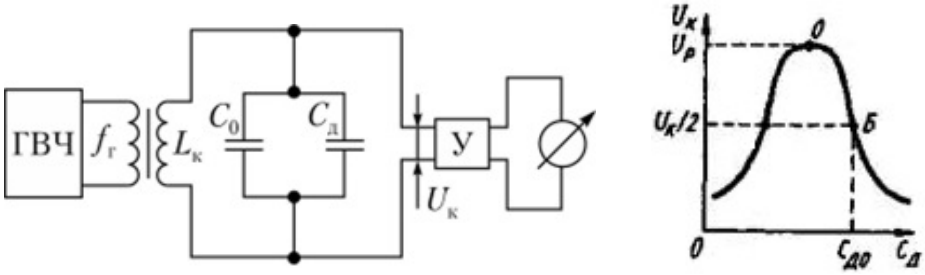


Рисунок 57 – Резонансная схема включения ёмкостного датчика

При помощи подстроечного конденсатора C_0 контур настраивается на частоту f_0, близкую (но не равную) к частоте генератора. Настройка производится при средней емкости датчика в диапазоне возможных изменений измеряемой величины. В результате настройки напряжение $U_к$, снимаемое с контура, должно быть примерно вдвое меньше (точка *Б* на рисунке 57), чем напряжение при резонансе $U_р$ (точка *О*). Таким образом, рабочая точка *Б* будет находиться примерно посередине одного из склонов резонансной характеристики. Этим обеспечиваются высокая чувствительность измерения (до 0,001%) и примерно линейная шкала измерительного прибора. Малейшее перемещение подвижной пластины датчика $C_Д$ приводит к существенному изменению напряжения контура. Уменьшение емкости ($C_{До}$-ΔC) приводит к увеличению напряжения, увеличение емкости ($C_{До}$+ΔC) – к уменьшению напряжения. При выборе рабочей точки на левом склоне резонансной характеристики (с помощью подстроенного конденсатора) уменьшение емкости приводит к уменьшению напряжения, и наоборот.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка выполнена в виде стенда, на передней панели которого установлен тензодатчик (упругий элемент в виде металлической балки равного сопротивления с наклеенным тензорезистором BF350-AA (рисунок 58), вольтметр, тумблер включения питания и тензоусилитель.

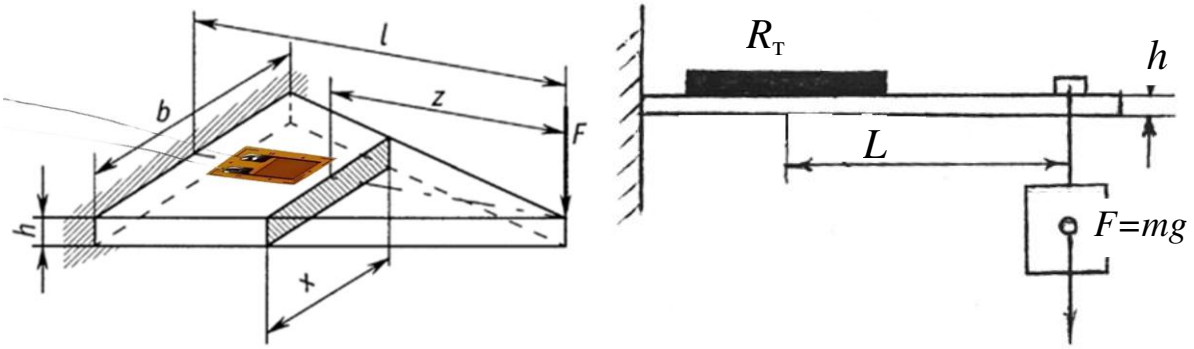


Рисунок 58 – Конструкция лабораторного тензорезистивного датчика

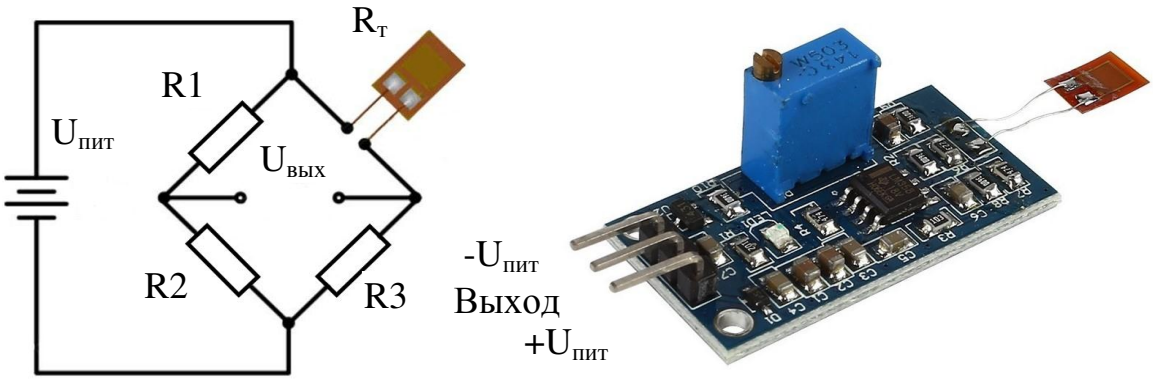
Балка равного сопротивления изгибу является наиболее рациональной, так как напряжения во всех поперечных сечениях будут приблизительно равны. Обозначим переменную ширину балки через x, ширину балки в защемлении b, высоту балки h. Тогда при постоянной толщине пластины балки должно выполнятся условие $x = bz/l$. Из этого соотношения видно, что ширина балки изменяется по линейному закону.

По сравнению с призматической балкой постоянного сечения экономия материала достигает 50%. Наибольший прогиб балки равного сопротивления изгибу в 1,5 раза превосходит прогиб балки постоянного сечения.

Характеристики тензорезистора BF350-AA:

- сопротивление – 350 Ом;
- материал подложки - модифицированный фенол;
- допуск среднего значения сопротивления ≤0,1%;
- коэффициент чувствительности – от 2,00 до 2,20;
- предел деформации – 2%;
- долговечность ≥ 1 миллионов циклов деформаций.

Датчик включен в схему измерительного моста (рисунки 44, б и 59, а)



а) б)

Рисунок 59 – Схема измерительного моста (а) и усилитель сигнала (б)

Так как изменение напряжения на выходе моста незначительно, используется усилитель сигнала (рисунок 59, б). Схема усилителя показана на рисунке 60.

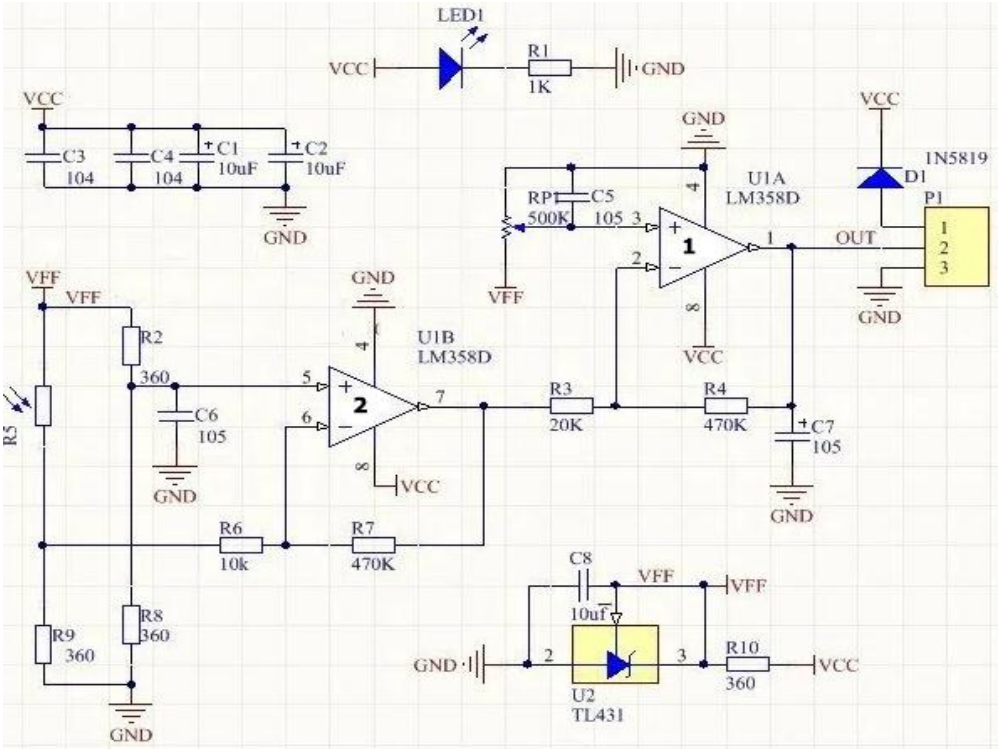


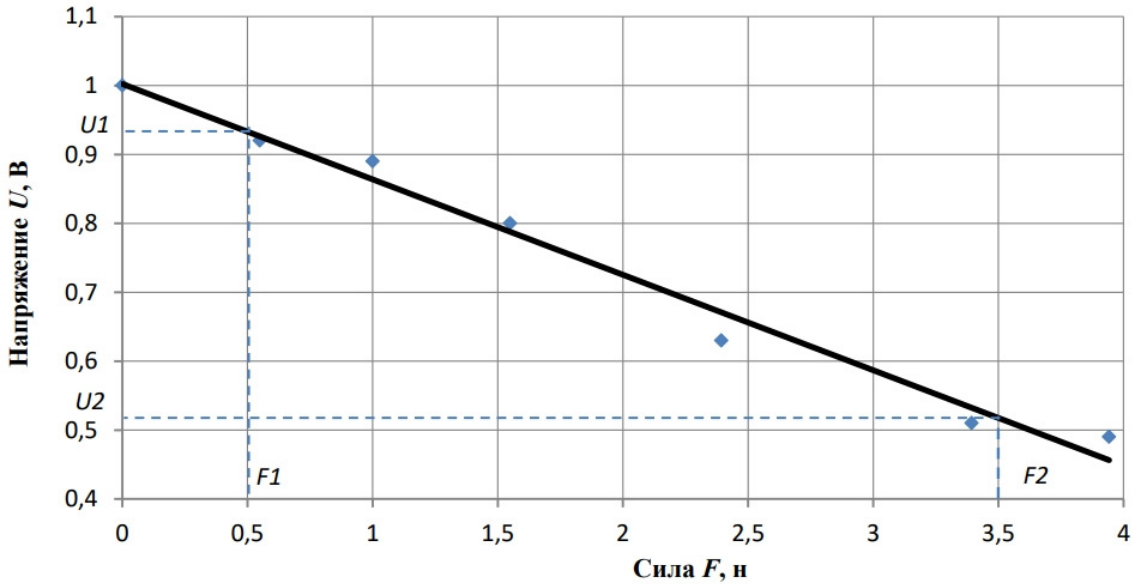
Рисунок 60 – Схема усилителя сигнала датчика (предоставлена производителем, выполнена без соблюдения российских стандартов)

Усилитель сигнала питается напряжением 5 *В* (блок питания смонтирован в корпусе лабораторной установки*)*, выходное напряжение усилителя 0-3,5 *В* подается на вольтметр, расположенный на передней панели лабораторной установки.

Резисторы измерительного моста, за исключением тензорезистора, являются частью усилителя сигнала. Для обеспечения низкой величины нестабильности напряжения питания моста используется интегральный стабилизатор напряжения параллельного типа *TL431* и фильтр на конденсаторах *C1-C4*. Двухкаскадный усилитель выполнен на микросхеме *LM358D*, представляющей собой два независимых, частотно-компенсированных операционных усилителя с высоким коэффициентом усиления. Для установки величины выходного напряжения используется подстрочный резистор. Индикация питания осуществляется при помощи миниатюрного светодиода *LED1*.

4. ПРОГРАММА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить устройство и принципы работы датчиков усилий.
2. Изучить конструкцию и принцип действия лабораторной установки.
3. При помощи грузов с известным весом снять зависимость выходного напряжения тензодатчика от величины веса *P* (рисунок 58). Для этого необходимо включить тумблер питания лабораторной установки, при помощи подстроечного резистора, расположенного на плате усилителя сигнала, установить заданное выходное напряжение усилителя без нагрузки тензодатчика (в переделах 0,8-2 В). Нагружая площадку грузиками, снять зависимость *U = f(P).*
4. Перевести вес в силу и построить тарировочный график (зависимость *U = f(F),):*



5. Определить коэффициент чувствительности тензодатчика, как отношение приращения выходного сигнала к приращению входного *k=(U2-U1)/(F2-F1)*.
6. Вычислить максимальную величину механического напряжения изгиба σ_{max} , возникающего в тензобалке при проведении эксперимента, воспользовавшись формулой:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W},$$

где M_{max} – максимальный изгибающий момент, Нм;

W – момент сопротивления тензобалки в месте наклейки тензорезистора.

Максимальный изгибающий момент:

$$M_{max} = F_{max} L,$$

где L – плечо, равное расстоянию от места приложения силы до центра наклеенных тензорезисторов.

Момент сопротивления тензобалки:

$$W = \frac{x \cdot h^2}{6},$$

где x, h – ширина и толщина тензобалки в месте наклейки тензорезистора (рисунок 58).

7. Сделать выводы по работе

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать схемы испытаний тензорезистивного датчика, графические зависимости, расчеты, выводы по работе.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков принцип работы тензорезисторов?
2. Какова конструкция проволочного тензорезистора?
3. Какова конструкция фольгового тензорезистора?
4. Какова конструкция полупроводникового тензорезистора?
5. Изобразите потенциометрическую схему включения тензорезистора.
6. Изобразите мостовую схему включения тензорезистора.
7. Какие упругие элементы используются в тензорезистивных датчиках силы?
8. Чем вызвана необходимость использования усилителя применительно к тензорезистивным датчикам?
9. Принцип действия пьезорезистивных и пьезорезонансных датчиков усилий.
10. Каков принцип работы магнитоупругого дроссельного датчика силы?

11. Каков принцип работы магнитоупругого трансформаторного датчика силы?
12. Какова конструкция и принцип работы магнитоупругого трансформаторного датчика с взаимно-перпендикулярным расположением обмоток?
13. Поясните устройство и принцип действия емкостных датчиков силы.
14. Как по графикам статических характеристик датчиков определить их передаточные коэффициенты?

Лабораторная работа № 6
РЕЛЕ АВТОМАТИКИ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

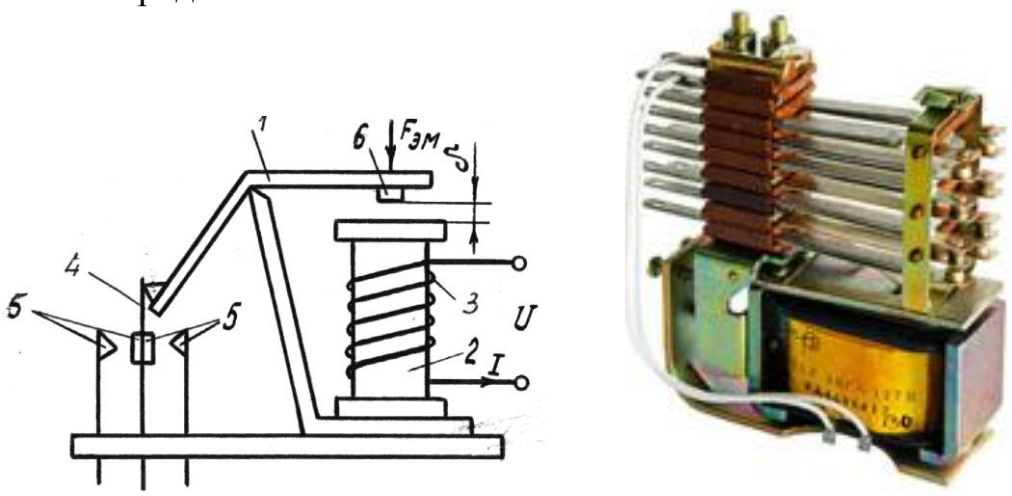
Изучение принципов действия реле автоматики, исследование их параметров и схем включения.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Электромагнитные реле

Принцип действия любого электромагнитного реле основан на взаимодействии подвижного ферромагнитного якоря с электромагнитом в виде ферромагнитного сердечника с обмоткой. Подвижный якорь связан с электрическими контактами, которые замыкаютя (размыкаются) в результате притягивания якоря к электромагниту под действием электромагнитной силы возникающей при протекании тока по обмотке. При обесточивании обмотки контакты под действием упругого элемента (пластины, пружины и т.п.) возвращаются в исходное состояние.

Различают реле постоянного и переменного тока. Реле постоянного тока подразделяют на нейтральные реле, работа которых не зависит от полярности входного сигнала, и поляризованные реле, чувствительные к полярности сигнала. В автоматике используют электромагнитные нейтральные реле: с поворотным якорем (рисунок 61), с втягивающим якорем (рисунок 62), ферриды и герконы (рисунки 63, 64). Ферриды и герконы являются безъякорными реле, отличающиеся малой массой и высоким быстродействием.

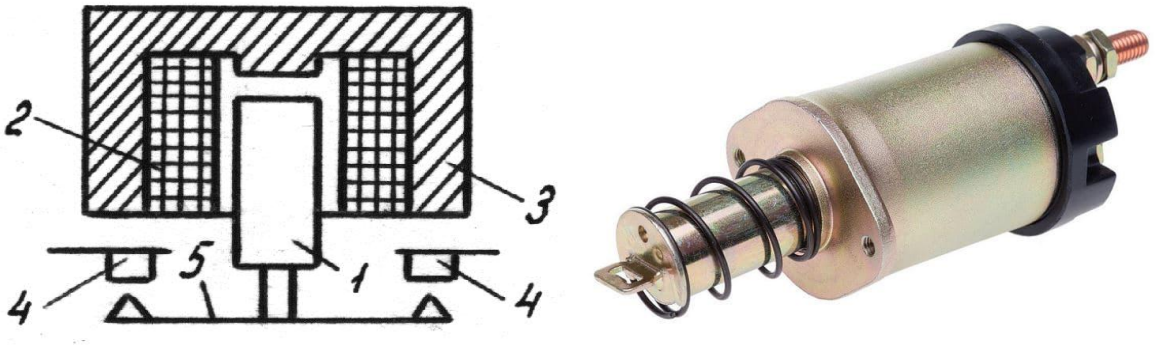


а) *б)*

схема (*а*) и общий вид (*б*); 1 – якорь; 2 – сердечник; 3 – обмотка; 4 – упругая пластина; 5 – контакты; 6 – штифт

Рисунок 61 – Электромагнитное реле постоянного тока с поворотным якорем

В нейтральном реле постоянного тока (рисунок 61) якорь 1 притягивается к сердечнику электромагнита, по обмотке 3 которого протекает ток. Перемещение якоря приводит к замыканию контактов 5. При отключении тока якорь и контакты возвращаются в исходное положение усилием упругой пластины 4. Чтобы под влиянием остаточного магнитного потока якорь не оставался притянутым к сердечнику, на нем укреплен штифт (штифт отлипания). Якорь и сердечник изготовлены из магнитного материала, а штифт – из немагнитного материала (латунь или медь).



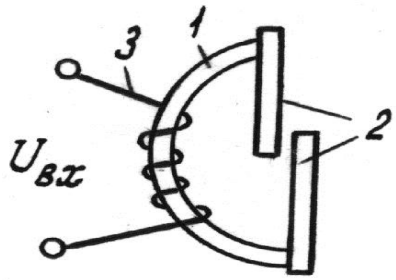
а) *б)*

схема (а) и общий вид (б); 1 – якорь; 2 – обмотка; 3 – сердечник; 4 – контакты; 5 – контактная перемычка

Рисунок 62 – Электромагнитное реле постоянного тока с втягивающим якорем

Феррид (рисунок 63) представляет собой устройство с магнитопроводом 1 из феррита с прямоугольной петлей гистерезиса и ферромагнитным контактом 2, выполненным из пермаллоя. На магнитопроводе размещена обмотка управления 3. В исходном положении сердечник размагничен, остаточный магнитный поток недостаточен для преодоления упругости контактов. Управляемая цепь разомкнута. В отличие от реле, в которых контакты работают при постоянном прохождении тока через обмотку, в ферриде на управляющую обмотку 3 достаточно подать импульс тока, необходимый для намагничивания сердечника, и контакты, замкнувшись, останутся в замкнутом состоянии за счет остаточного магнитного потока ферромагнетика.

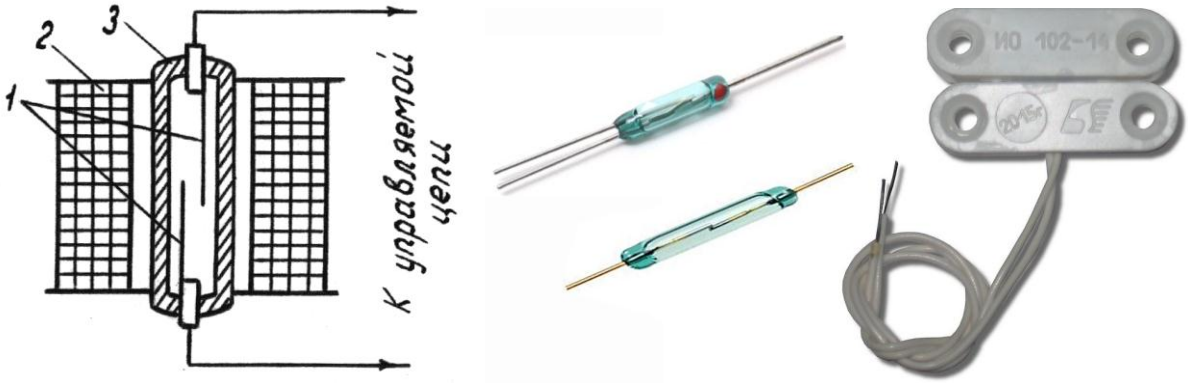
Для размыкания контактов в обмотку необходимо подать импульс тока противоположного направления, чтобы размагнитить магнитную систему. Однако обратный импульс не должен создавать напряженность, превышающую коэрцитивную силу, так как в противном случае возможно новое срабатывание элемента от магнитного потока противоположного знака.



1 – магнитопровод; 2 – ферромагнитные контакты; 3 – обмотка управления

Рисунок 63 – Безъякорное реле-феррид

В реле с герметизированными контактами (рисунок 64) при протекании тока через обмотку 2 возникает магнитное поле, которое намагничивает контактные пружины 1, расположенные внутри стеклянного баллона 3, наполненного инертным газом. При этом контакты 1 притягиваются друг к другу и замыкают электрическую цепь. Для улучшения контакта концы пермаллоевых пластин покрывают золотом, серебром, радием. Контакты геркона также замыкаются под воздействием поля постоянного магнита. На рисунке 44 *в* представлен пример герконового датчика открытия дверей или окон, который может использоваться в охранных системах.



а) *б)* *в)*

схема (*а*), стеклянные баллоны с контактами (*б*), герконовый датчик, работающий на размыкание (*в*) ; 1 – ферромагнитные контактные пружины;
2 – обмотка; 3 – стеклянный баллон

Рисунок 64 – Реле с герметизированными контактами

Поляризованное реле (рисунок 65) отличается от нейтрального электромагнитного реле тем, что имеет дополнительный постоянный магнит. В таких реле направление перемещения якоря зависит от направления постоянного тока, протекающего по обмотке реле. Поток Φ_0 постоянного магнита NS проходит через якорь и далее одна часть этого

потока $Ф_{01}$ замыкается через левую часть сердечника, а другая $Ф_{02}$ – через правую половину сердечника. Если якорь переброшен влево, то воздушный зазор между левым полюсом сердечника и якорем меньше, чем зазор справа от якоря, поэтому поток $Ф_{01}$ будет больше $Ф_{02}$. Следовательно, электромагнитная сила, притягивающая якорь к левому полюсу сердечника, будет больше, чем сила, притягивающая якорь к правому полюсу. Из-за этого якорь будет оставаться возле левого полюса. При подведении входного напряжения через обмотку будет протекать ток I, который создает поток Ф. Направление потока Ф определяется по правилу буравчика. В левом зазоре потоки Ф и $Ф_{01}$ направлены навстречу, а в правом Ф и $Ф_{02}$ – в одну сторону, поэтому результирующий поток справа от якоря будет больше, чем слева, и якорь, перебросится вправо. Контакт якоря разомкнется с левым контактом реле и замкнется с правым.

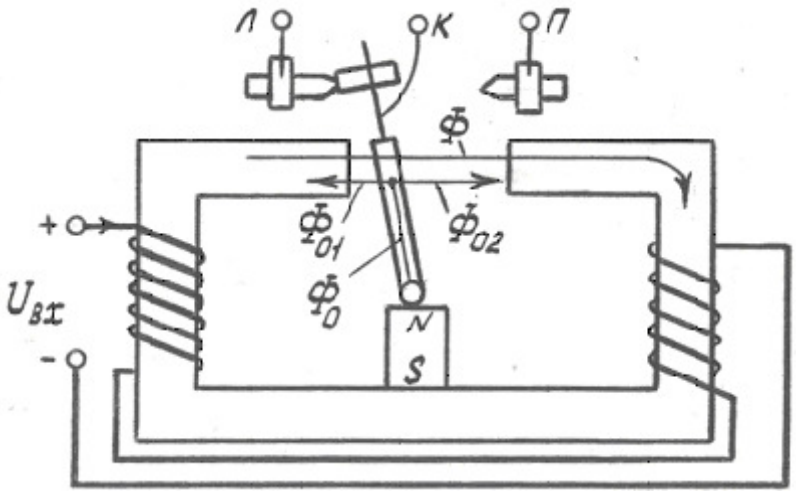


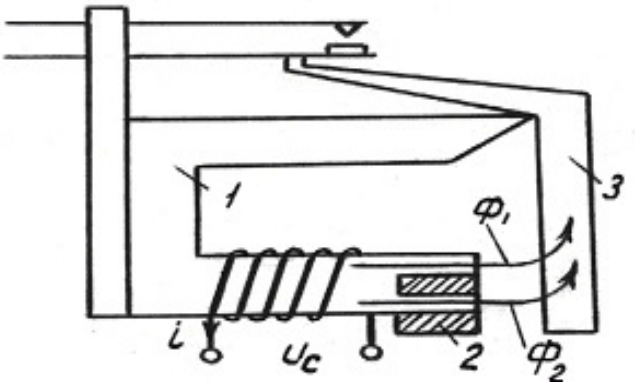
Рисунок 65 – Поляризованное реле

При изменении полярности входного напряжения меняется направление тока и потока Ф на обратное, вследствие чего в зазоре слева от якоря поток будет больше, чем справа, и якорь переместится влево. Поляризованное реле обладает высокой чувствительностью, большим коэффициентом усиления и малым временем срабатывания, поэтому их применяют в схемах маломощной автоматики в тех случаях, когда требуется высокая чувствительность или быстродействие.

Конструкции реле переменного тока аналогичны конструкциям электромагнитных нейтральных реле постоянного тока. У этих реле применяют специальные меры для уменьшения вибрации якоря и контактов, обусловленной тем, что ток в обмотке дважды за период принимает нулевые значения. Для этого чаще всего один полюс сердечника 1 раздваивают и на одну из его половин (рисунок 66) помещают медный короткозамкнутый виток 2.

Ток I создает магнитный поток, который разветвляется в полюсе сердечника на два потока $Ф_1$ и $Ф_2$. Поток $Ф_2$ индуцирует в короткозамкнутом витке ток, препятствующий изменениям потока $Ф_2$. В результате по-

ток Φ_2 отстает по фазе от потока Φ_1, поэтому, когда $\Phi_1 = 0$, $\Phi_2 \neq 0$ и наоборот, имеется электромагнитная сила, прочно удерживающая якорь 3 возле сердечника. В реле переменного тока с целью снижения потерь от вихревых токов магнитопровод набирается из пластин электротехнической стали, изолированных друг от друга.



1 – сердечник; 2 – короткозамкнутый виток; 3 – якорь

Рисунок 66 – Электромагнитное реле переменного тока

Электромагнитные реле характеризуются следующими основными параметрами: рабочим напряжением обмотки, допустимым напряжением и током контактов, а также временем срабатывания реле. Кроме указанных параметров с эксплуатационной точки зрения представляет интерес коэффициент запаса по срабатыванию $К_{ср}$ и коэффициент запаса по отпусканию $К_{отп}$, которые рассчитываются так:

$$К_{ср} = U_р/U_{ср} \quad \text{или} \quad К_{ср} = I_р/I_{ср};$$

$$К_{отп} = U_р/U_{отп} \quad \text{или} \quad К_{отп} = I_р/I_{отп},$$

где $U_р$, $I_р$ – рабочее напряжение и ток реле;
$U_{ср}$, $I_{ср}$ – напряжение и ток срабатывания реле;
$U_{отп}$, $I_{отп}$ – напряжение и ток отпускания реле.

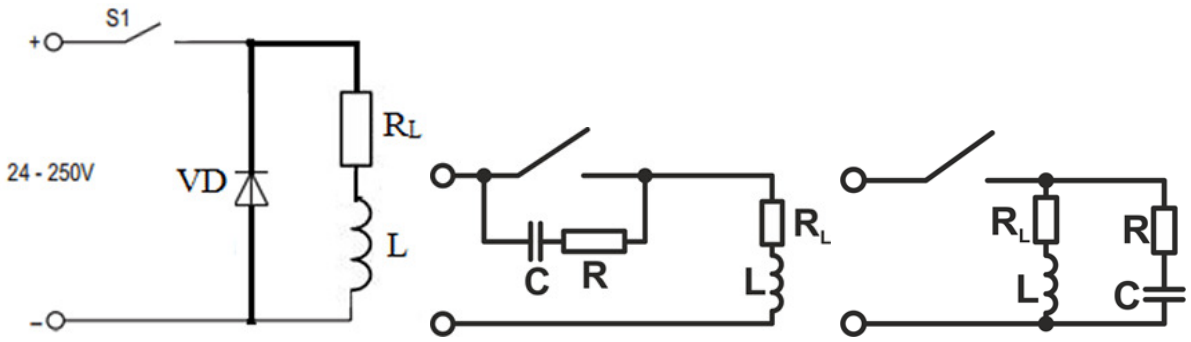
Эксплуатационнику $К_{ср}$ и $К_{отп}$ необходимо определять при ревизиях реле, а также после перемотки их катушек на другое напряжение. Для надежной работы реле $К_{ср}$ и $К_{отп}$ должны находиться в пределах 1,6–2,5.

По времени срабатывания $t_{ср}$ и отпускания $t_{отп}$ реле делятся на безинерционные ($t_{ср} \leq 0{,}001$ с; $t_{отп} \leq 0{,}001$ с), быстродействующие ($t_{ср} < 0{,}05$ с;
$t_{отп} < 0{,}05$ с), нормальные ($0{,}05$ с $< t_{ср} < 0{,}15$ с; $0{,}05$ с $< t_{отп} < 0{,}15$ с) и замедленные ($t_{ср} > 0{,}15$ с; $t_{отп} > 0{,}15$ с).

2.2 Методы и схемы защиты контактов электромагнитных реле от износа и создания выдержек времени

В процессе эксплуатации к контактам реле зачастую подключают индуктивную нагрузку (устройства, имеющие в своём составе катушку индуктивности). Последствия возникновения ЭДС самоиндукции при размыкании таких электрических цепей крайне негативно отражаются на работоспособности контактов реле и выходных каскадов датчиков, уменьшая их срок эксплуатации. В целях устранения пагубного влияния ЭДС самоиндукции применяются искрогасящие цепи, устанавливаемые параллельно контактам реле или параллельно нагрузке.

В цепях постоянного тока кремниевый диод включается параллельно индуктивной нагрузке, при замыкании контактов и в установившемся режиме не оказывает никакого воздействия на работу схемы (рисунок 67 *а*). При отключении нагрузки возникает напряжение самоиндукции, обратное по полярности рабочему напряжению, диод открывается и шунтирует индуктивную нагрузку. Диоды наиболее эффективно предохраняют контакты реле от обгорания и являются лучшим решением, по сравнению с любыми другими схемами искрогашения. Такой способ применим и к сигнализаторам с транзисторным выходом.



а) *б)* *в)*

Рисунок 67 – Схемы уменьшения износа контактов электромагнитного реле

RC-цепь является наиболее дешёвым и широко применяемым средством защиты цепей как переменного, так и постоянного тока (рисунок 67 *б* и *в*).

В отличие от диодных схем, RC-цепи можно устанавливать как параллельно нагрузке, так и параллельно контактам реле. В некоторых случаях нагрузка физически недоступна для монтажа на ней искрогасящих элементов, и тогда единственным способом защиты контактов остается шунтирование контактов. RC-цепь, подключаемая параллельно нагрузке применяется там, где нежелательна или невозможна установка RC-цепи параллельно контактам реле.

В схемах автоматики зачастую возникают задачи создания задержек по времени при срабатывании и отпускании реле. Основные схемы изменения времени срабатывания и отпускания реле показаны на рисунке 68. Они работают следующим образом.

В схемах, полазанных на рисунке 68 *а* и *б* при замыкании контакта К2 за счет тока, создаваемого ЭДС самоиндукции обмотки в замкнутом контуре (резистор R – обмотка реле К1, диод V– обмотка реле К1), обеспечивается задержка времени на отпускание реле. В схеме *в* длительность включения реле определяется длительностью протекания тока заряда конденсатора С (резистор R предназначен для разряда конденсатора С после размыкания контакта К2, его сопротивление должно быть на несколько порядков больше сопротивления обмотки реле К1). В *г* после замыкания контакта К2 реле К1 сработает при заряде конденсатора до напряжения срабатывания реле. Длительность задержки зависит от постоянной времени $\tau = CR$.

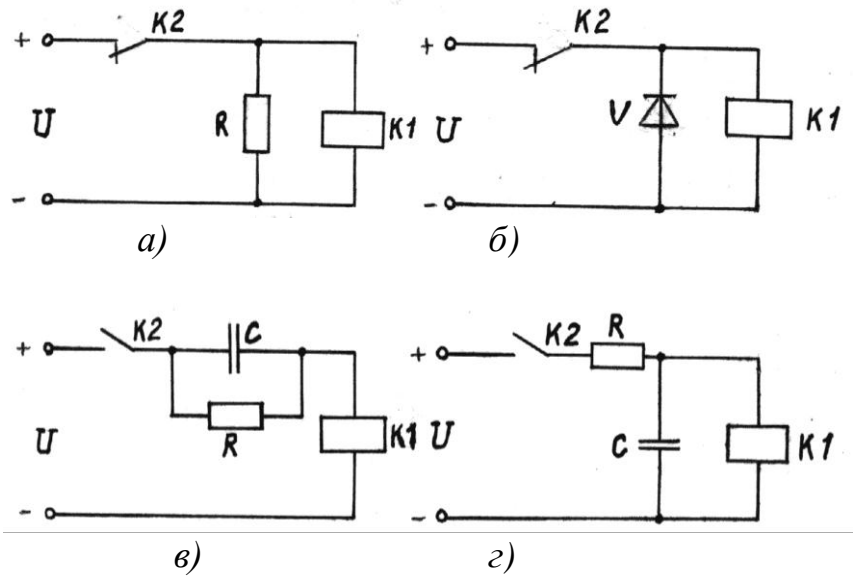


Рисунок 68 – Схемы замедления отпускания (*а, б*), обеспечения определенной длительности включения (*в*) и задержки включения (*г*) реле постоянного тока

2.3 Использование электромагнитных реле в схемах автоматики

Электромагнитные реле в схемах автоматического управления служат для усиления слабых сигналов и реализации логических функций. На рисунке 69 показана схема усиления слаботочного сигнала ртутного электроконтактного термометра (В). Подобная схема может применяться в простейшей системе стабилизации температуры в инкубаторах.

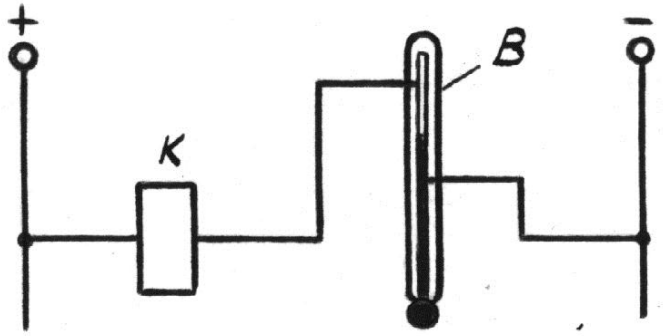
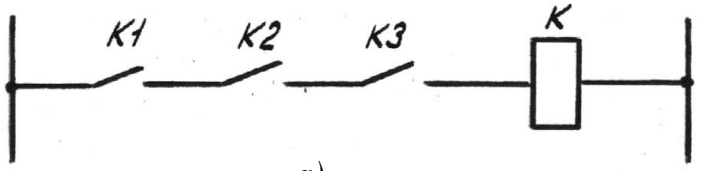
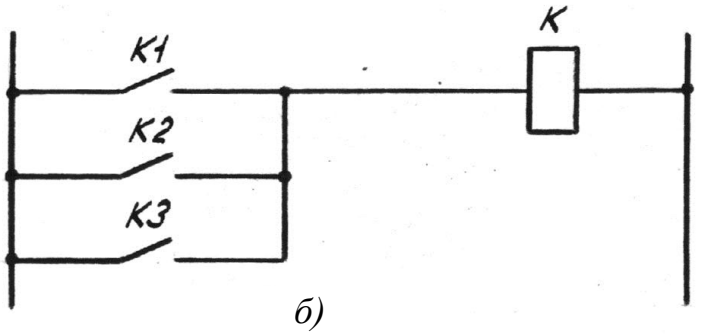


Рисунок 69 – Использование реле в качестве усилителя

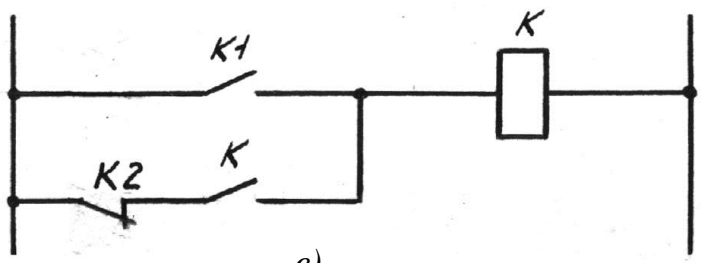
Несколько примеров применения электромагнитных реле для реализации логических функций показано на рисунке 70. В схеме логической функции «И» (рисунок 70 *а*) реле К включится только тогда, когда замкнутся контакты и К1, и К2, и К3. Реле К в схеме логической функции «ИЛИ» (рисунок 70 *б*) сработает при включении контактов К1 или К2, или К3. Схема логической функции «ПАМЯТЬ» изображена на рисунке 70 *в*. При кратковременном включении контакта К1 реле включится, то есть схема «запомнит» сигнал контакта К1. Сброс схемы (возврат в исходное состояние) произойдет после размыкания контакта К2. Последнюю схему (рисунок 70 *в*) еще называют схемой самоблокировки реле.



а)



б)



в)

а – логическая функция «И»; *б* – логическая функция «ИЛИ»;
в – логическая функция «ПАМЯТЬ»

Рисунок 70 – Примеры схем логических функций

В системах автоматического управления часто используют схему взаимной блокировки двух реле (рисунок 71). Такая схема не допускает одновременного включения двух реле (магнитных пускателей), что достигается введением в цепь обмотки одного реле размыкающих контактов другого реле. Кнопки S1, S2 и S3, S4 предназначены соответственно для включения и отключения реле. Логическую функцию памяти можно также реализовать с помощью безъякорного реле-феррида, а также с использованием некоторых типов поляризованных реле, у которых подвижный якорь после переключения остается в таком положении до тех пор, пока на обмотку не будет подано напряжение обратного знака.

Электромагнитные реле используют также для реализации функции «ЗАДЕРЖКА». Для этого применяют рассмотренные выше методы создания выдержек времени реле (см. рисунок 68).

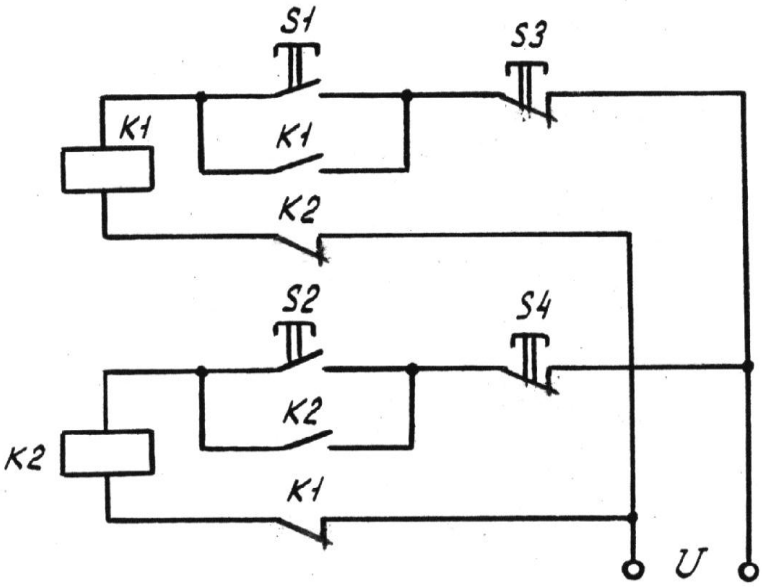


Рисунок 71 – Схема взаимной блокировки реле

2.4 Твердотельные реле

Твердотельное реле (ТТР, от англ. SSR – Solid-state relay) – это электронное устройство, предназначенное для коммутации электрических цепей без использования механических контактов. В отличие от электромеханических реле, в ТТР используются полупроводниковые элементы (например, тиристоры, симисторы, MOSFET или IGBT-транзисторы), что обеспечивает высокую надежность, долговечность и быстродействие. Устройство применяется для тех же функций, что и обычное реле.

ТТР имеют более высокую скорость переключения, чем электромеханические реле и полную гальваническую развязку между входной и выходной цепями. Твердотельные реле менее приспособлены к выдерживанию кратковременных перегрузок (превышению предельно допустимых токов и напряжений), чем их электромеханические аналоги, и имеют более высокое сопротивление в замкнутом состоянии.

В большинстве моделей ТТР гальваническая развязка входной и выходной цепей осуществляется с помощью оптрона. Управляющее напряжение питает светодиод, который освещает фотодиод, ток на котором включает тиристор или МОП-транзистор, чтобы управлять нагрузкой. Возможно также применение специализированных оптоэлектронных приборов: фототиристоров и оптотиристоров.

Гальваническая развязка управляющей и исполнительной цепей не требует дополнительных мер изоляции такого реле. Структура твердотельных реле (рисунок 72) у разных производителей относительно схожа, и все реле такого типа имеют незначительные отличия.



Рисунок 72 – Структурная схема твердотельного реле

Входная цепь твердотельного реле может состоять из резистора, включенного последовательно с оптопарой или быть более сложной. Функция входной цепи в том, чтобы принять сигнал управления для последующего осуществления коммутации.

Дальше по схеме – оптическая развязка, которая обеспечивает изоляцию между входной, промежуточными и выходной цепями твердотельного реле. Входной сигнал обрабатывается триггерной цепью, которая и управляет переключением выхода твердотельного реле.

Переключающая цепь подает напряжение на нагрузку. Обычно эта часть состоит из транзистора, тиристора или симистора.

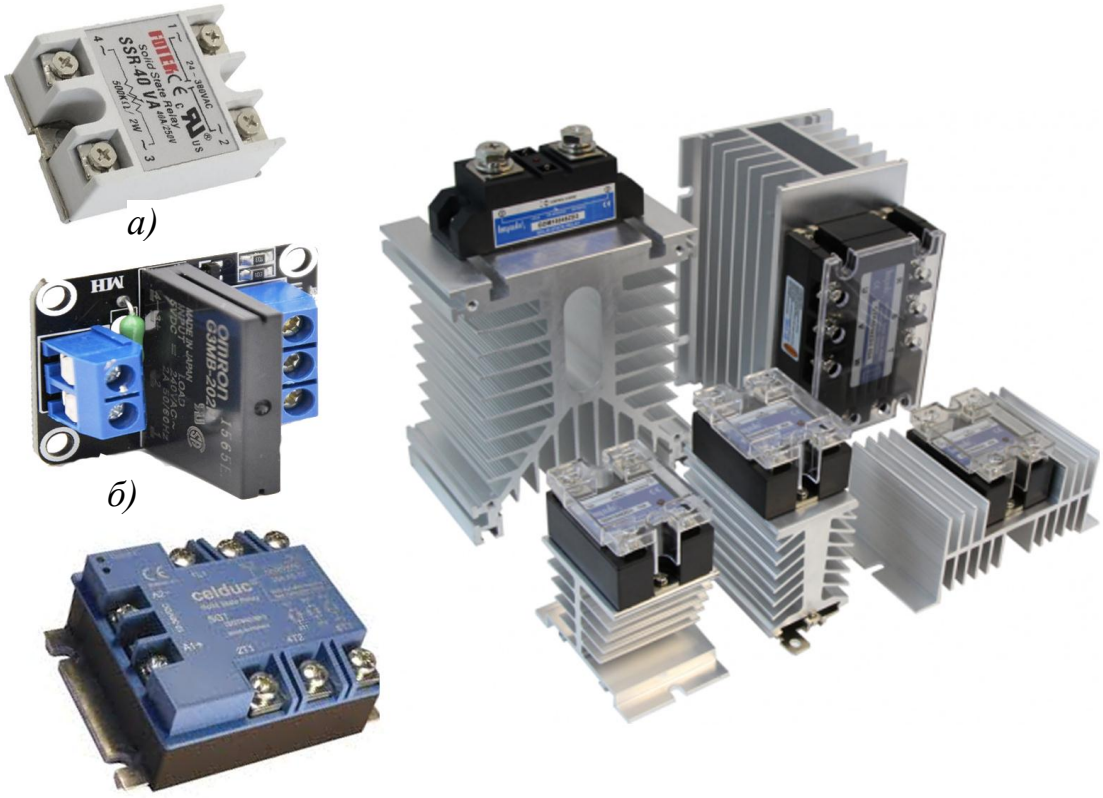
Защитная цепь необходима для надежной работы твердотельных реле с разными типами нагрузок, в том числе индуктивных. Однако несмотря на наличие во всех твердотельных реле защитной цепи, все же имеются различные модификации, и некоторые из таких реле не допускают индуктивных нагрузок, а другие – специально для них приспособлены.

Силовые полупроводники обладают некоторым внутренним сопротивлением, поэтому при коммутации нагрузки происходит нагрев твердотельного реле. При нагреве выше 60 ^{o}C, происходит снижение допустимой величины коммутируемого тока, поэтому при тяжелых режимах работы такому реле требуется дополнительный отвод тепла. Для

этого применяется радиатор или даже воздушное охлаждение (рисунок 73 *б*).

Для индуктивных нагрузок рекомендуется обеспечить запас по допустимому току в 2–4 раза, а если речь идет об управлении асинхронным двигателем, то запас по току должен быть десятикратным.

Твердотельного реле классифицируются по нескольким параметрам, таким как входное напряжение, ток, выходное напряжение, тип тока, падение напряжения, условия эксплуатации.



а) *б)* *в)* *г)*

а – однофазное; *б* – модульное; *в* – трехфазное; *г* – на радиаторах

Рисунок 73 – Твердотельные реле

Большинству ТТР свойственно однозначное превосходство над электромеханическими реле:

- меньшие размеры, позволяющие создавать более компактные устройства;
- полная бесшумность работы;
- большая скорость переключения;
- увеличенный срок службы;
- выходное сопротивление не меняется во время всего срока службы, в отличие от традиционных реле, у которых окисляются и деградируют контакты;

- отсутствие искры, что позволяет использовать устройство на взрыво- и пожароопасных объектах;
- меньшая чувствительность к вибрациям, магнитным полям, влажности и запылённости воздуха.

Недостатки ТТР:

- вследствие отсутствия механических контактов;
  - в открытом состоянии происходит нагрев за счёт сопротивления p-n – перехода, и достаточно мощные реле требуют охлаждения;
  - в закрытом состоянии имеют большое, но не бесконечное сопротивление, а также обратный ток утечки (порядка микроампер);
  - вольт-амперная характеристика контакта нелинейная;
  - некоторые типы требуют соблюдения полярности выходных цепей (рассчитаны на коммутацию только постоянного тока);
  - при выходе из строя имеют тенденцию закорачивать выходные контакты вследствие пробоя силового ключа, тогда как обычные реле, чаще всего, остаются разомкнутыми;
  - требуют принятия мер против ложных срабатываний из-за скачков напряжения (из-за очень высокой скорости срабатывания) ;
  - не сразу способны пропустить ток в обратном направлении из-за наличия полупроводникового перехода.

3 ПРОГРАММА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить принципы действия реле и конструкции реле, установленных на стенде.
2. Изучить схемы логических функций, выполненных на основе электромагнитных реле.
3. Экспериментально определить коэффициенты запаса реле по срабатыванию $К_{ср}$ и отпусканию $К_{отп}$. На основе их анализа сделать выводы о пригодности реле к эксплуатации. Для этого необходимо собрать испытательную схему (рисунок 74) и экспериментально определить напряжение срабатывания $U_{ср}$ и отпускания $U_{отп}$ нескольких реле (по заданию преподавателя) и рассчитать $К_{ср}$ и $К_{отп}$.

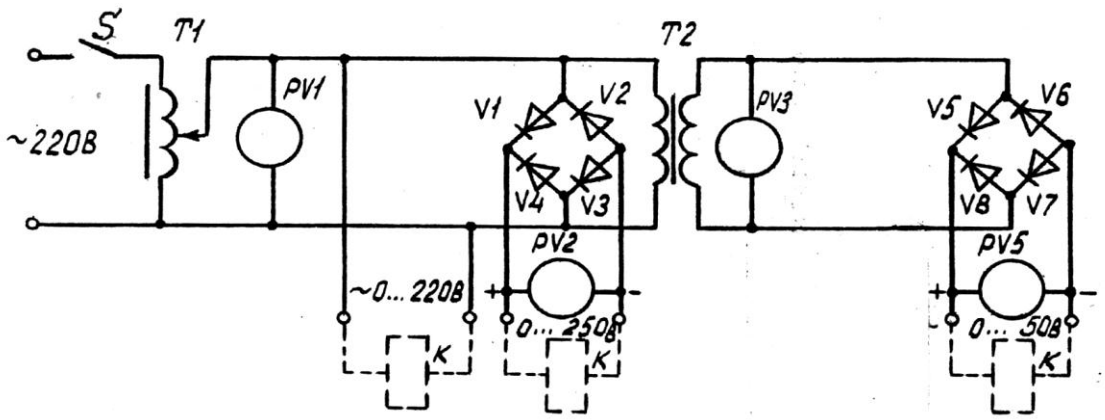


Рисунок 74 – Схема испытания реле

4. Изучить методы и схемы создания выдержек времени электромагнитных реле и экспериментально исследовать схему создания выдержек времени с помощью конденсаторов по заданию преподавателя (рисунок 68 *в* или *г*).

   Для этого необходимо:

   - используя специальный блок, подключить его к источнику постоянного напряжения 0–50 В;
   - подключить электросекундомер к розетке сети 220 В через соответствующий контакт реле (рисунок 75);

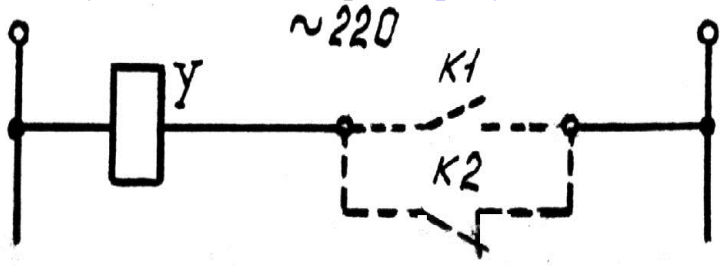


Рисунок 75 – Схема включения электросекундомера

   - установить напряжение питания схемы 25 В и для различных значений емкости конденсатора экспериментально определить зависимость времени задержки от емкости конденсатора $T_в = f(C)$. Объяснить характер полученной закономерности;

5. Собрать схему, показанную на рисунок 76 и экспериментально проверить работу твердотельного реле. Для этого, необходимо выполнить следующие действия:

   - вращая ручку автотрансформатора против часовой стрелки уановить напряжение, равное «0» на источнике питания постояного тока 0–50 В;
   - подсоединить источник питания постояного тока 0–50 В к клемам цепи управления твердотельного реле (3–32 В), соблюдая полярность;
   - подсоединить электросекундомер к розетке сети 220 В последовательно с выходной цепью твердотельного реле;

- после проверки схемы преподавателем постепенно увеличивая и уменьшая напряжение питания при помощи автотрансформатора проверить работу твердотельного реле.

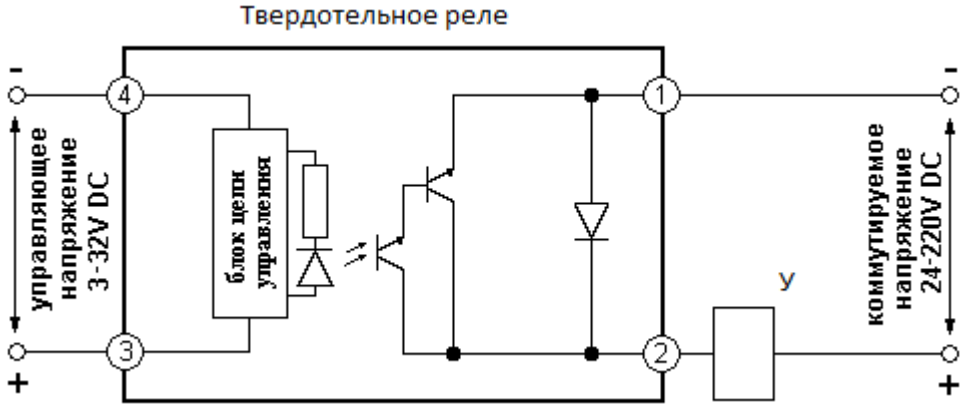


Рисунок 76 – Схема подключения твердотельного реле

4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать схемы логических функций, все испытательные схемы, необходимые расчеты и графики а также выводы в соответствии с п.3.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков принцип работы электромагнитных реле?
2. Каков принцип работы реле-феррида?
3. Каков принцип работы реле, построенного на основе геркона?
4. Каков принцип работы поляризованного реле?
5. В чем отличие реле переменного тока от реле постоянного тока?
6. Какими основными параметрами характеризуются электромагнитные реле?
7. Каким образом можно обеспечить изменение времени срабатывания и отпускания электромагнитных реле?
8. Электромагнитное реле, как усилитель в схемах автоматики. Как вы это понимаете?
9. Изобразите схему логической функции «И», построенную на основе реле.
10. Изобразите схему логической функции «ИЛИ», выполненную с помощью реле.
11. Изобразите схему логической функции «ПАМЯТЬ», построенную на основе реле.
12. Что такое коэффициент запаса по срабатыванию и отпусканию реле и для каких целей они используются в эксплуатационной практике ?
13. По каким параметрам выбирается реле?
14. Какова физическая сущность работы схем по созданию выдержек времени реле с помощью конденсаторов ?

15. Что такое «твердотельное реле»?
16. Какие преимущества имеют твердотельные реле по сравнению с электромагнитными реле?
17. Какие недостатки имеют твердотельные реле по сравнению с электромагнитными реле?

Лабораторная работа № 7
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ И ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Освоить метод определения динамических характеристик объектов и элементов систем автоматического управления (регулирования) по экспериментально снятым переходным характеристикам.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Методика экспериментального определения динамических характеристик

К динамическим характеристикам объектов управления (регулирования) и элементов автоматических систем относятся дифференциальные уравнения, передаточные функции, переходные функции и частотные характеристики. Для их определения существуют аналитические и экспериментальные методы. При использовании аналитических методов на основе общих законов физики (механики, гидравлики, теплотехники, электротехники и других), которые положены в основу работы объектов (элементов), определяют их дифференциальные уравнения, являющимися исходными динамическими характеристиками.

Один из экспериментальных методов базируется на основе опытного определения переходных характеристик. Сущность данного метода состоит в следующем (рисунок 77). На вход объекта управления (элемента) подается ступенчатое входное воздействие, в результате на выходе объекта управления (элемента) возникает переходный процесс, который регистрируется. Полученная таким образом графическая зависимость y = y(t) называется переходной характеристикой или кривой разгона (рисунок 78).

$$X(t)=\begin{cases}0 \text{ при } t<0;\\ X_0 \text{ при } t\geq 0.\end{cases}$$

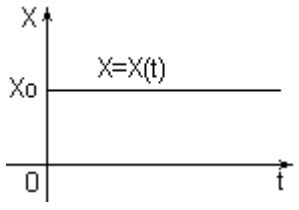


Рисунок 77 – Ступенчатое воздействие (ступенчатая функция)

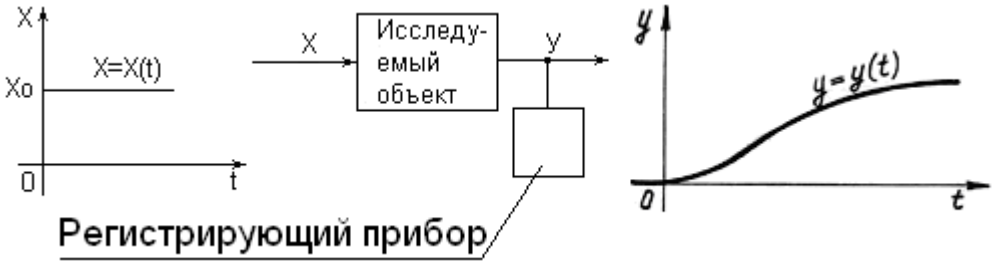


Рисунок 78 – Экспериментальное определение переходной функции

По виду кривой разгона подбирается дифференциальное уравнение или передаточная функция, коэффициенты которых определяются по параметрам переходной функции и ступенчатого воздействия. Если переходные характеристики исследуемых объектов (элементов) по своему виду идентичны переходным характеристикам типовых (элементарных) звеньев, то выбирают дифференциальные уравнения или передаточные функции соответствующих типовых звеньев, определяя их параметры по известным методикам и формулам. Рассмотрим некоторые примеры динамических звеньев.

2.2 Апериодическое звено первого порядка

Данное звено имеет переходную характеристику, показанную на рисунке 79.

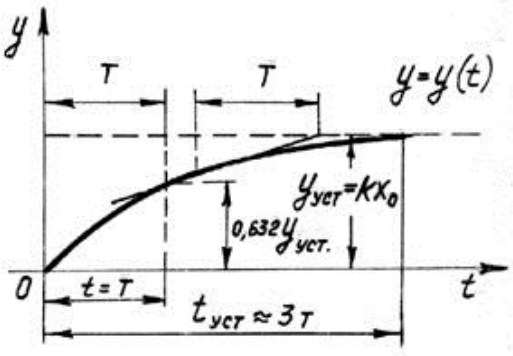


Рисунок 79 – Переходная характеристика апериодического звена первого порядка

Дифференциальное уравнение звена имеет вид:

$$T\frac{dy}{dt} + y = kx,$$

следовательно, его передаточная функция:

$$W(p) = \frac{k}{Tp+1},$$

где y – выходная величина (координата);

x – входная величина (координата);

k – коэффициент передачи;

T – постоянная времени.

Постоянная времени Т определяется из графика переходной функции, как величина проекции касательной на линию установившегося значения

$y = y_{уст}$ (рисунок 79), причем во всех точках кривой она одинакова. Так как касательные к экспериментальной кривой разгона проводить точно бывает затруднительно, то берется две-три точки кривой, находится для каждой из них величина T и принимается среднее ее значение. Кроме того, для уточнения этого значения используется следующее свойство кривой: в точке при $t = T$ выходная величина должна иметь значение $y = 0{,}632\ y_{уст}$. Размерность постоянной времени T – время.

Коэффициент передачи определяется так:

$$k = \frac{y_{уст}}{x_0}\left(\frac{размерность\ y}{размерность\ x}\right).$$

Аналитическое выражение переходной функции, представляющее решение уравнения (3), является экспоненциальной зависимостью следующего вида:

$y(t) = y_{уст}(1-e^{-t/T})$.

2.3 Апериодическое звено второго порядка

Его переходная функция приведена на рисунке 80.

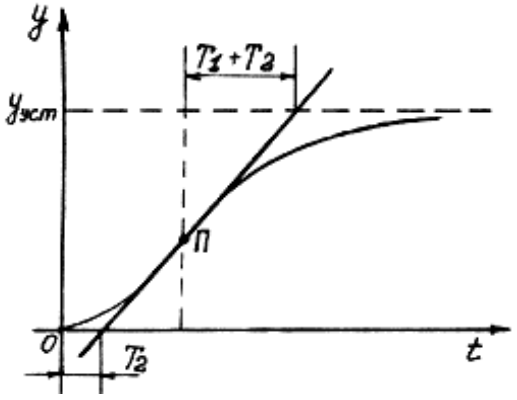


Рисунок 80 – Переходная характеристика апериодического звена второго порядка

Апериодическое звено второго порядка эквивалентно по своим динамическим свойствам двум последовательно включенным звеньям первого порядка. Оно описывается дифференциальным уравнением

$$T_1 T_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + (T_1 + T_2)\frac{dy}{dt} + y = kx,$$

и передаточной функцией

$$W(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} = \frac{k}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2) p + 1},$$

где x и y – соответственно входная и выходная величина (координата) звена;

T_1 и T_2 – постоянные времени, определяемые по переходной характристике (рисунок 80).

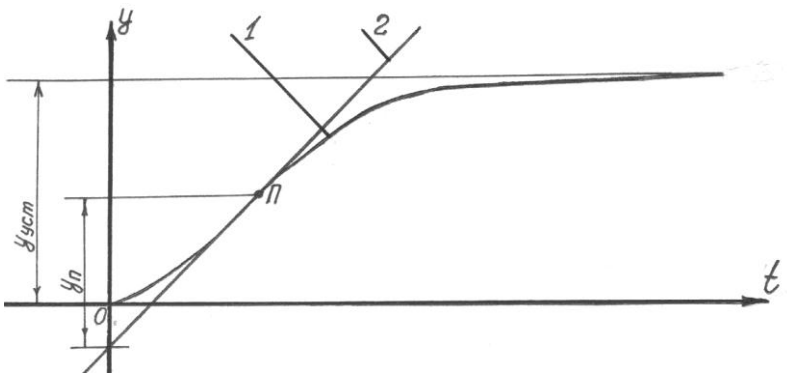
Коэффициент передачи определяется аналогично апериодическому звену первого порядка:

$$k = \frac{y_{уст}}{x_0}\left(\frac{размерность\ y}{размерность\ x}\right).$$

Аналитически кривая разгона апериодического звена второго порядка представляет собой сумму двух экспонент и является решением уравнения динамики при $x=x_0$ и нулевых начальных условиях:

$$y(t) = y_{уст}\left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-t/T_1} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-t/T_2}\right).$$

При этом следует иметь в виду, что S-образная кривая разгона (рисунок 80) не всегда соответствует апериодическому звену второго порядка. Для такого соответствия должно выполняться определенное отношение значений ординат кривой разгона $\gamma = y_п/y_{уст}$ (рисунок 81).



1 – кривая разгона $y = y(t)$; 2 – касательная

Рисунок 81 – К определению порядка дифференциального уравнения

Ордината y_n определяется посредством проведения касательной 2 в точке перегиба «*П*» кривой разгона 1 (точка перегиба – это точка, в кото-

рой касательная к кривой разгона имеет максимальный наклон). Для апериодического звена второго порядка $\gamma \approx 0{,}37$. Если $\gamma > 0{,}37$, то исследуемый объект (элемент) рекомендуется описывать дифференциальным уравнением третьего порядка. При этом можно использовать метод Симою, описанный ниже. Подбор дифференциальных уравнений более высокого порядка на основании кривой разгона не целесообразен, так как определение коэффициентов этих уравнений не может быть проведено с достаточной точностью.

2.4 Определение коэффициентов дифференциальных уравнений и передаточных функций методом Симою

Если экспериментальная *S*-образная кривая разгона не соответствует апериодическому звену второго порядка, то динамические свойства исследуемого объекта (элемента) следует аппроксимировать звеном третьего порядка, описываемым дифференциальным уравнением

$$b_3 \frac{d^3 y}{dt^3} + b_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + b_1 \frac{dy}{dt} + y = kx$$

и передаточной функцией

$$W(p) = \frac{k}{b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + 1},$$

где k – коэффициент передачи;

b_1, b_2, b_3 – коэффициенты, определяемые по кривой разгона с помощью метода Симою.

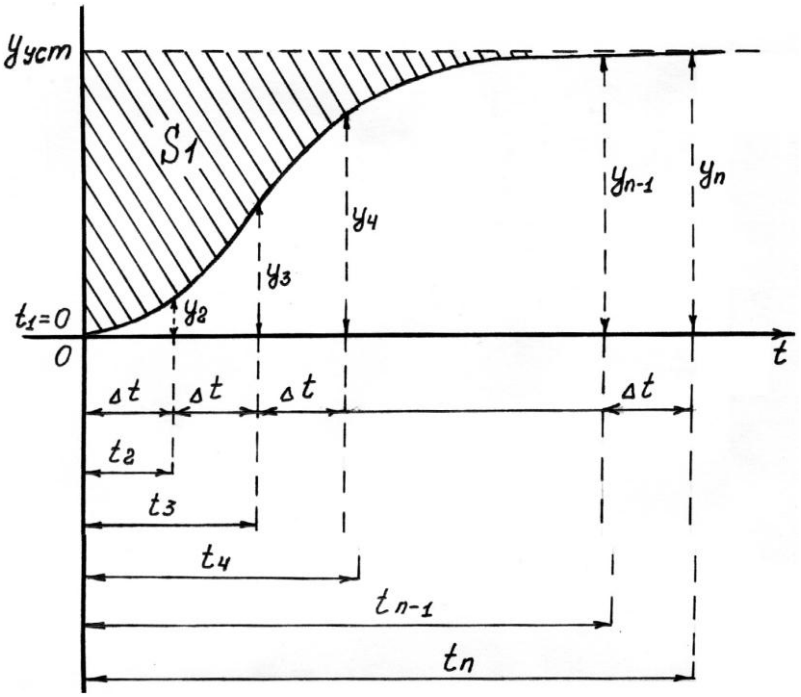


Рисунок 82 – Графическое определение коэффициентов дифференциального уравнения по методу Симою

По экспериментальной кривой разгона через интервал времени Δt определяется n-ое количество значений ординат y_i (рисунок 82). При этом следует иметь в виду, что чем меньше Δt, тем выше точность обработки экспериментальной кривой разгона. По найденным ординатам y_i рассчитываются их относительные значения

$y = y_i / y_{уст}$.

Коэффициент b_1 определяется площадью S_1, заключенной между кривой разгона и прямой $y = y_{уст}$ (рисунок 82), и вычисляется так:

$$b_1 = S_1 = \int_0^{\infty} (1 - y)\,dt,$$

где y – выходная величина в относительных единицах.

Площадь находится численным интегрированием по формуле трапеций:

$$S_1 = [1/2(z_i + z_n) + z_2 + z_3 + z_4 + \ldots + z_{n-1}]\,\Delta t,$$

где $z_i = 1 - y_i$.

Коэффициент b_2:

$$b_2 = S_1^2\,(1 - S_2),$$

где S_2 – так называемая площадь второго порядка, которая вычисляется с помощью формулы:

$$S_2 = \Delta t / S_1^2\,[m_2 + m_3 + \ldots + m_{n-1}],$$

где $m_i = (1 - y_i)t_i$; $m_1 = 0$, $m_n = 0$.

Коэффициент $b_3 = S_1^3\,(1 - 2S_2 + 0{,}5\,S_3)$,

где S_3 – так называемая площадь третьего порядка, величина которой рассчитывается так:

$$S3 = \Delta t / S_1^3\,[r2 + r3 + \ldots + rn\text{-}1],$$

где $r_i = (1 - y_i)\,t_i^2$.

Коэффициент передачи определяется аналогично апериодическому звену первого порядка:

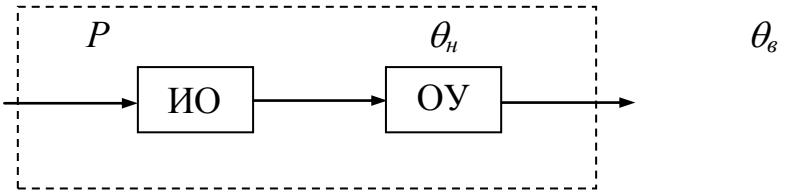
$$k = \frac{y_{уст}}{x_0}\left(\frac{размерность\ y}{размерность\ x}\right).$$

После того, как определены числовые значения коэффициентов, они подставляются в дифференциальное уравнение динамики. Затем это уравнение решается при нулевых начальных условиях и значении ступенчатого воздействия $x = x_0$. В результате решения находится аналитическая зависимость кривой разгона, с использованием которой рассчитывается и строится график. На основании сравнения экспериментальной и расчетной кривых разгона устанавливается соответствие найденного дифференциального уравнения динамическим свойствам исследуемого объекта (элемента).

2.5 Описание лабораторной установки

В лабораторной работе исследуется физическая модель теплового объекта управления (регулирования). К таким объектам относятся парники и теплицы с воздушным обогревом, инкубаторы, сушильные шкафы и т.п.

Выходной (управляемой, регулируемой) величиной в таких объектах является температура воздуха $\theta_в$ (внутри помещения или камеры), а входной величиной (управляющим, регулирующим воздействием) – температура $\theta_н$ нагревательных элементов, выполняющих функции исполнительного органа (рисунок 83). Входной величиной исполнительного органа является мощность, потребляемая нагревательными элементами P.



ОУ – объект управления (регулирования); ИО – исполнительный орган – электрические нагреватели

Рисунок 83 – Структурная схема объекта исследований

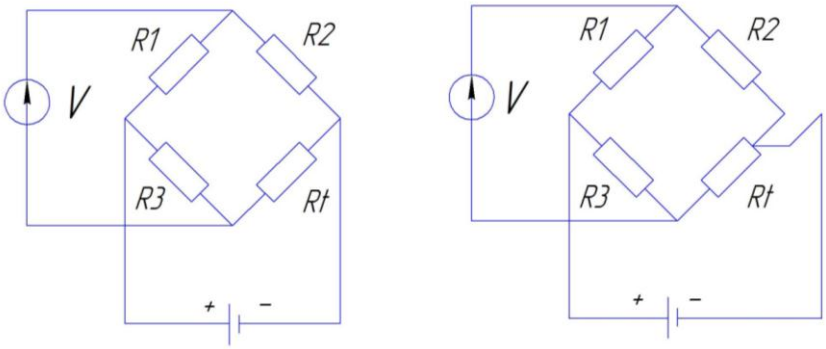
Физическая модель объекта исследований выполнена в виде камеры прямоугольной формы с открывающимся корпусом (прозрачный закрытый корпус из стекла и полистирола толщиной 2 мм, задняя стенка представляет собой задвижку из текстолита толщиной 4 мм). Внутри корпуса установлены 2 нагревательных элемента (керамических резистора ПЭВР-25 сопротивлением 10 Ом каждый). Для измерения температуры использован термометр сопротивления ОВЕН ДТС094-50, представляющий собой медную проволоку, помещенную в стальную трубку. Установленный внутри корпуса объекта исследований вентилятор предназначен для интенсификации процесса изменения температуры.

В нижней части модели теплового объекта смонтированы следующие компоненты: измерительный мост, связанный с датчиком температуры, трансформатор питания нагревательных элементов, электронный усилитель с электромагнитными реле для включения и отключения нагревательных элементов, коммутационная плата для согласования датчика температуры и нагревательных элементов с платой ввода-вывода сигналов, расположенной в ПЭВМ, тумблер включения и три светодиода индикации режимов работы. Мощность, выделяемая на каждом резисторе во включенном состоянии составляет 15,9 Вт. Связь модели объекта и ПЭВМ осуществляется при помощи специального кабеля.

Датчик температуры (термометр сопротивления) имеет чувствительный элемент, который представляет собой пластмассовый цилиндр с намотанной в несколько слоев медной проволокой диаметром 0,1 мм.

Сверху катушка покрыта глифталевым лаком. К концам обмотки припаяны медные выводные провода диаметром 1,0–1,5 мм. Провода изолированы между собой асбестовым шнуром или фарфоровыми трубочками. Чувствительный элемент вставлен в тонкостенную металлическую гильзу. Гильза с выводными проводами помещена в защитный чехол, который представляет собой закрытую с одного конца трубку. Принцип действия термопреобразователя сопротивления основан на свойстве проводника изменять электрическое сопротивление с изменением температуры окружающей среды.

В лабораторной работе для подключения термометра сопротивления используется измерительный мост. В простейшем случае мостовая схема содержит четыре резистора, соединенных в кольцевой замкнутый контур. Такую схему имеет мост постоянного тока (рисунок 84).



а) *б)*

а – двухпроводная; *б* – трехпроводная

Рисунок 84 – Схемы подключения термометра сопротивления

Резисторы R1, R2, R3 и R4 этого контура называются плечами моста, а точки соединения соседних плеч – вершинами моста. Цепи, соединяющие противоположные вершины, называют диагоналями. Одна из диагоналей содержит источник питания, а другая подключается ко вторичному прибору (в данном случае к плате ввода-вывода, установленной в ПЭВМ). Мост является уравновешенным, если напряжение на диагонали, содержащей вторичный прибор, отсутствует и ток через вторичный прибор равен нулю. Так как сопротивление датчика зависит от температуры, то, следовательно, и напряжение на выходе измерительного моста также зависит от температуры.

В связи с тем, что температурные изменения сопротивления проводов в измерительном мосте (рисунок 84 *а*) приводят к погрешности измерения температуры, вторичные преобразователи термометров сопротивления выполняются так, чтобы максимально уменьшить эту погрешность. В лабораторном стенде используется трехпроводная схема (рисунок 84 *б*), в которой по одной жиле кабеля к термометру подводится напряжение питания. К плечам моста термометр подсоединяется с помощью двух других жил, включенных в смежные плечи моста. Одинаковые изменения их сопротивлений практически не разбалансируют мост. Таким образом, ис-

ключается погрешность, которая могла бы быть при изменении температуры кабеля.

В лабораторной работе для ввода сигнала от датчика температуры в ПЭВМ используется многофункциональная плата ввода-вывода PCI-1711LS (рисунок 85). Плата установлена в слот PCI ПЭВМ, а коммутационная плата установлена в корпусе модели теплового объекта.



Рисунок 85 – Плата PCI-1711LS

Основным элементом платы PCI-1711LS является аналогово-цифровой преобразователь (АЦП). Напряжение с измерительного моста подается
на вход АЦП, выполняющего операции дискретизации (квантования) и кодирования. С помощью дискретизации весь диапазон изменения входного напряжения делится на большое число ступеней. Определение числового значения сводится к сравнению входного напряжения с известным образцовым напряжением и формированием на выходе кодовой комбинации, соответствующей одному из уровней дискретизации.

ПЭВМ, использующаяся в лабораторной установке, предназначена для автоматизации эксперимента. Программная часть реализована в SCADA-системе GeniDAQ (SCADA – от английского S*upervisory Control Fnd Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных)*. При помощи ПЭВМ можно включать и отключать нагреватели, отображать график переходного процесса на экране и сохранять файл данных в текстовом файле.

Лабораторная установка позволяет снимать кривую разгона исполнительного органа совместно с объектом управления при одном или двух включенных нагревателях, что соответствует подаче входного воздействия мощностью 15,9 или 31,8 Вт. Открытием заслонки можно изменить постоянную времени объекта управления.

Возможно снятие кривой разгона отдельно для объекта управления, для этого надо открыть корпус и включить нагреватель на время более 15 минут. Затем закрыть корпус и включить запись данных на ПЭВМ.

2.6 Обработка экспериментальных данных

Так как в данной лабораторной работе используется аналогово-цифровое преобразование, экспериментальные данные представляют собой массив чисел, записанных в текстовый файл в два столбца. Каждая строка содержит два числа – время опроса датчика температуры, прошедшее от начала эксперимента и текущую температуру в момент измерения. Измеренные значения температуры имеют погрешность, имеющую случайный характер. Возникновение погрешности связано как с процессами, происходящими в аналоговых цепях (датчик, измерительный мост, коммутационная плата, источник питания, соединительные провода) так и с погрешностями дискретизации (оцифровки). Обычно на переходной характеристике строят отклонение выходной величины от начального (установившегося) значения, т.е. предполагают, что элемент имел нулевые начальные условия. График приращения температуры, построенный в электронных таблицах по экспериментальным данным, показан на рисунке 86 (столбец «C» получен путем вычитания из каждого значения столбца «B» начального значения температуры).

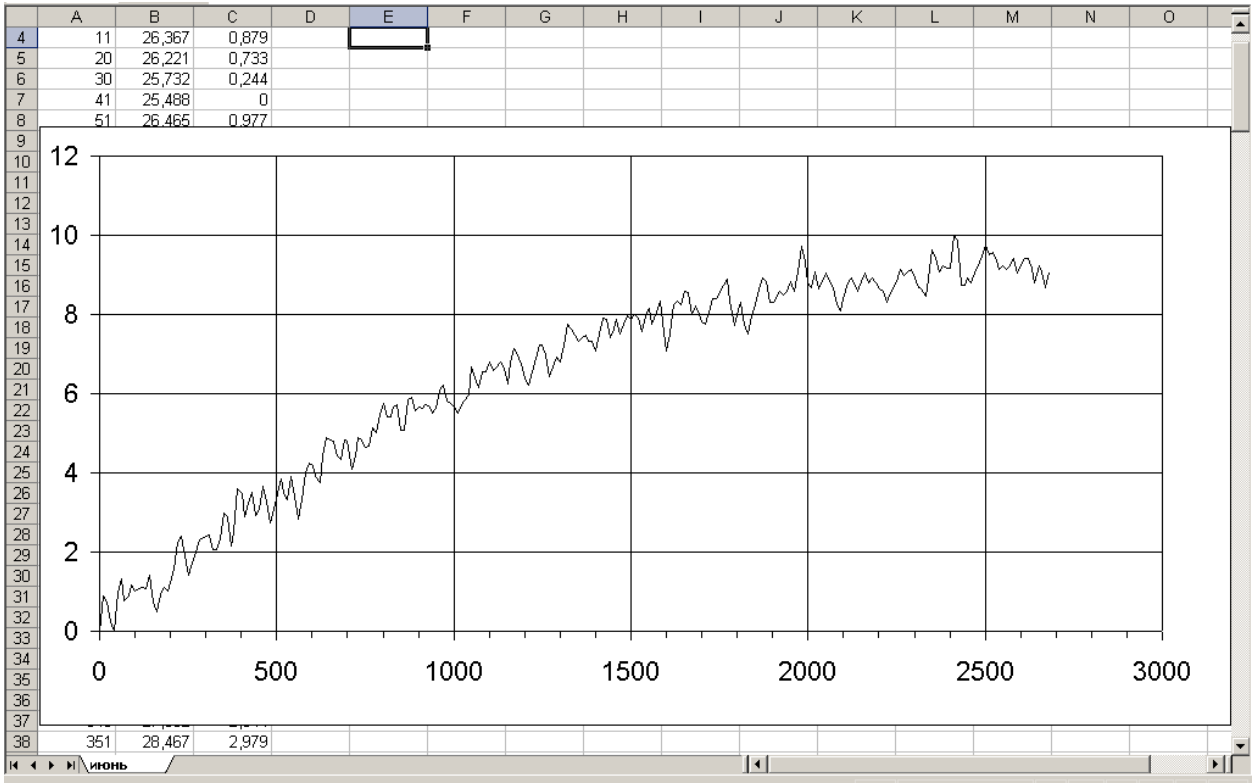


Рисунок 86 – Экспериментальная зависимость, построенная в электронных таблицах

Для дальнейшей работы с экспериментальными данными полученную зависимость необходимо сгладить, т.е. построить гладкую кривую, исключив влияние случайных погрешностей измерения и оцифровки сигнала. Для этих целей экспериментальные данные необходимо подвергнуть аппроксимации.

Основная задача аппроксимации – построение приближенной (аппроксимирующей) функции, наиболее близко проходящей около данных точек. В электронной таблице для аппроксимации имеется возможность построения линии тренда, в данном случае наиболее удобно использовать аппроксимацию полиномом (многочленом) 5-го порядка вида:

$$\Delta\Theta = c_0 + c_1 t^2 + c_2 t^3 + c_3 t^4 + c_4 t^5 \ ,$$

где $\Delta\Theta$ – превышение температуры от начального значения;

t – время;

$c_0 - c_4$ – неизвестные коэффициенты.

Результат обработки экспериментальных данных показан на рисунке 87. Полученная в результате аппроксимации зависимость пригодна для определения дифференциального уравнения.

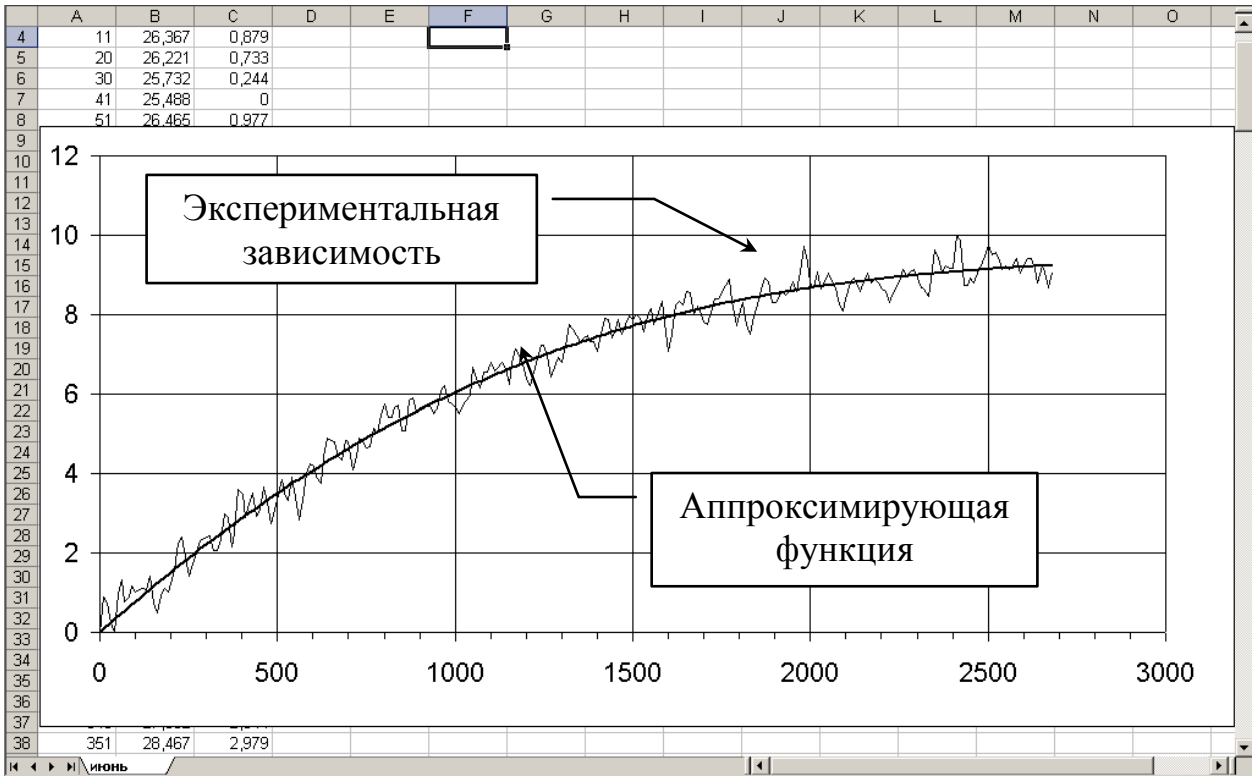


Рисунок 87 – Аппроксимация экспериментальных данных

3 ПРОГРАММА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с конструкцией и особенностями лабораторной установки.
2. Получить от преподавателя вариант задания на выполнение лабораторной работы: 1-й вариант – снятие кривой разгона исполнительного органа и объекта управления при включении одного нагревательного элемента (величине входного воздействия 15,9 Вт; 2-й вариант – снятие кривой разгона исполнительного органа и объекта управления при включении двух нагревательных элементов (величине входного воз-

действия 31,8 Вт); 3-й вариант – снятие кривой разгона объекта управления при включении одного нагревательного элемента (величине входного воздействия 15,9 Вт); 4-й вариант – снятие кривой разгона объекта управления при включении двух нагревательных элементов (величине входного воздействия 31,8 Вт). При выполнении 1 и 2 вариантов необходимо охладить объект управления (если он был нагрет на предыдущем занятии). Для этого надо открыть корпус на время 5–7 минут при выключенных нагревателях.

3. Для проведения эксперимента выполнить следующую последовательность действий:
   - включить ПЭВМ;
   - запустить программу GeniDAG Builder. При загрузке нажать «OK»;
   - через команду меню ***Файл → Открыть*** загрузить файл D:\termo.gni, при этом **запрещается** делать какие-либо изменения в программе;
   - запустить файл на исполнение командой ***Запуск → Старт***. В появившемся окне ввода ввести имя файла для записи данных;
   - на макете объекта управления перевести тумблер питания в верхнее положение;
   - для вариантов 1 и 2 щелчком мышью по кнопкам *«Нагреватель 1»* и *«Нагреватель 2»* включить один или оба нагревательных элемента и кнопку *«Запись»*. Наблюдать по графику переходный процесс до достижения установившегося значения температуры;
   - для снятия кривой разгона только объекта управления по вариантам 3 и 4 открыть корпус объекта управления, включить один или оба нагревателя, через 15–20 минут закрыть корпус, щелкнуть мышкой по кнопке *«Запись»* и наблюдать по графику переходный процесс до достижения установившегося значения температуры;
   - отключить запись данных и нагревательные элементы при достижении температурой установившегося значения;
   - остановить стратегию командой ***Запуск → Стоп*** и закрыть программу GeniDAG Builder;
   - загрузить электронную таблицу и открыть созданный на предыдущем этапе файл данных. При открытии файла указать тип файла *«Все файлы»*. При открытии файла данных в окне *«Мастер текстов (импорт)»* в качестве символа-разделителя (шаг 2) указать пробел. На шаге 3 нажать кнопку *«Подробнее»* и указать разделитель целой и дробной части «.». Нажать *«OK»*. Нажать *«Готово»*. Учтите, что в различных версиях электронных таблиц этот порядок действий может отличаться, при правильно проведенном импорте данных в листе электронной таблицы дробные числа будут иметь в качестве разделителя запятую;

- добавить справа от данных столбец величин отклонения температуры от начального значения (см. п. 2.6);
- выделить данные (столбец времени и столбец отклонения температуры от начального значения). Построить график отклонения температуры от начального значения командой ***Вставка → Точечная → Точечная с гладкими кривыми;***
- щелкнуть правой кнопкой мыши по линии графика и выбрать команду *«Добавить линию тренда»*. Выбрать вид аппроксимации *«Полиномиальное»* (степень 5, установить опцию *«Пересечение кривой с осью Y в точке 0,0»*;
- щелкнуть правой кнопкой мыши по исходному графику и выбрать команду *«Формат ряда данных»*. Установить опцию ***Цвет линии → Нет линии***.

4. По виду кривой разгона, пользуясь рекомендациями п. 2.2–2.4, выбрать дифференциальное уравнение и передаточную функцию, а также определить числовые значения их коэффициентов.

4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

В отчете необходимо кратко привести методику экспериментального определения переходной характеристики, график, построенный по результатам аппроксимации экспериментальных данных, расчеты и методику определения коэффициентов дифференциального уравнения, найденную передаточную функцию объекта. В заключении отчета сделать общие выводы по работе.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что относится к динамическим характеристикам объектов управления и элементов?
2. Что такое линейное и нелинейное дифференциальное уравнение?
3. Понятие передаточной функции объекта управления и элемента САУ (САР). Как определяется передаточная функция на основе дифференциального уравнения?
4. Что такое ступенчатая функция?
5. Что такое переходная функция (кривая разгона)?
6. Понятие типового (элементарного) звена. Как классифицируются типовые звенья?
7. Какова методика определения дифференциальных уравнений и передаточных функций объектов управления (элементов) САУ (САР)?
8. Как определить коэффициент передачи объекта управления (элемента) по параметрам ступенчатого воздействия и кривой разгона?
9. Как определить постоянную времени по кривой разгона объекта (элемента), динамические свойства которого идентичны апериодическому звену первого порядка?

10. Как определить постоянные времени по кривой разгона объекта (элемента), динамические свойства которого идентичны апериодическому звену второго порядка?
11. Как по S-образной кривой разгона определить порядок дифференциального уравнения?
12. Как получить аналитическое выражение кривой разгона на основе дифференциального уравнения?

Лабораторная работа № 8
ЦИФРОВОЙ ПИД-РЕГУЛЯТОР

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить принцип действия цифрового ПИД-регулятора на примере непрерывной САР температуры.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Принцип действия цифровых ПИД-регуляторов

Системы автоматического управления, стабилизирующие управляемую величину в заданных пределах или изменяющие ее по определенному закону, называются *системами автоматического регулирования* – САР (или *автоматическими системами регулирования* – АСР), а их управляющее устройство – автоматическим регулятором. Основной настройкой регуляторов является *уставка* (величина, которую поддерживает регулятор). Системы автоматического регулирования являются наиболее распространенными автоматическими устройствами в производстве, а автоматические регуляторы серийно выпускаются многими компаниями.

Тип регулятора и закон управления (регулирования) выбирают в зависимости от технологических показателей, свойств объекта управления (ОУ), а также требований к качеству процесса регулирования. Свойства объекта управления в первом приближении могут быть оценены по отношению времени запаздывания в канале управления τ к постоянной времени объекта T_o. Чем это отношение больше, тем задача автоматизации сложнее, и поэтому обычно рекомендуют при $\tau/T_o<0,2$ применять позиционный регулятор, $0,2\le\tau/T_o\le1$ – регулятор непрерывного действия, $\tau/To>1$ – импульсный регулятор. Эти рекомендации не исчерпывающие, так позиционные регуляторы характеризуются автоколебаниями регулируемой величины, и если технология автоматизируемого процесса не допускает автоколебательного режима, то возможно применение регулятора непрерывного действия.

На практике, как правило, используют типовые регуляторы непрерывного действия, названия которых соответствуют названиям типовых законов регулирования:

1) *П-регулятор* (пропорциональный регулятор). Принцип действия заключается в том, что он вырабатывает управляющее воздействие на объект пропорционально величине отклонения управляемой величины от заданного значения (чем оно больше, тем больше управляющее воздействие). Регулятор имеет один настроечный параметр. Такие регуляторы широко распространены, однако имеется зависимость статической ошибки от возмущающего воздействия.

2) *И-регулятор* (интегрирующий регулятор). Управляющее воздействие пропорционально интегралу от отклонения управляемой величины от заданного значения. Регулятор имеет один настроечный параметр. Такой регулятор не имеет статической ошибки, но применим только к объектам управления, имеющим свойства самовыравнивания.

3) *Д-регулятор* (дифференцирующий регулятор). Вырабатывает управляющее воздействие только при изменении регулируемой величины, т.е. управляющее воздействие пропорционально скорости изменения управляемой величины от ее заданного значения. Регулятор имеет один настроечный параметр. Применим на объектах с незначительной инерционностью.

На практике данные простейшие регуляторы комбинируются в регуляторы вида: ПИ-регулятор (пропорционально-интегральный регулятор) и ПД-регулятор (пропорционально-дифференциальный регулятор). Они имеют по два настроечных параметра. Наиболее часто используется ПИД-регулятор пропорционально-интегрально-дифференциальный, поскольку он сочетает в себе достоинства всех трех типовых регуляторов. Кроме того, из ПИД-регулятора легко получить любой закон, приравняв соответствующие настроечные параметры к нулю.

Регулятор, включенный в САР, может иметь несколько настроечных коэффициентов (например, ПИД-регулятор – три), изменяющихся в широких пределах. При этом при определенных значениях настроек система управления будет управлять объектом в соответствии с технологическими требованиями, при других может привести к неустойчивому состоянию. Поэтому стоит задача не только определить настройки, соответствующие устойчивой системе, но и выбрать из них оптимальные. Оптимальными настройками регулятора называются настройки, которые соответствуют минимуму (или максимуму) какого-либо показателя качества.

Требования к показателям качества устанавливаются исходя из требований технологии. Чаще всего накладываются требования на время регулирования и величину перерегулирования (максимальное отклонение управляемой величины от установившегося значения). Изменяя настройки таким образом, чтобы уменьшить перерегулирование, мы можем прийти к слишком большому времени регулирования, что нецелесообразно. И наоборот, стремясь уменьшить время регулирования, мы получаем более колебательные процессы.

При разработке автоматизированного технологического процесса одной из главных задач является стремление к максимальному использованию типовых, серийно-выпускаемых устройств, что сокращает не только срок проектирования, но и сроки изготовления и настройки системы управления, а также снижает конечную стоимость и упрощает дальнейшую эксплуатацию.

Ассортимент предлагаемой на рынке продукции отечественных и зарубежных компаний включает сотни наименований приборной продукции, широкую линейку преобразователей физических величин (датчиков)

и блоков питания, программируемые логические контроллеры, барьеры искрозащиты для работы на взрыво- и пожароопасных участках, программные средства для автоматизации инженерных систем жилых, офисных и производственных зданий (отопления, вентиляции, кондиционирования, водоснабжения, освещения и прочее). Так же производятся измерители-регуляторы, которые служат для измерения и регулирования различных величин (температуры, давления, веса и т.д.). По принципу регулирования бывают одно- и двухканальные, по виду управляющего воздействия возможно как двухпозиционное так и непрерывное регулирование.

Для автоматического извлечения информации о состоянии объекта управления служат датчики (первичные преобразователи). Они представляют собой весьма разнообразные по принципам действия устройства, воспринимающие изменения контролируемых параметров технологических процессов. Современная измерительная техника может непосредственно оценивать более 300 различных физических, химических и других величин. Выходные сигналы всех этих датчиков преобразуются в стандартные электрические или пневматические сигналы, которые передаются другим устройствам.

Управляющий сигнал, вырабатываемый регулятором, преобразуется в управляющее воздействие непосредственно на объект регулирования при помощи разнообразных исполнительных элементов, вид и принцип действия которых определяется устройством объекта управления.

Задачей компаний, разрабатывающих типовые регуляторы, является создание максимально унифицированных устройств, способных получать информацию от разнообразных датчиков и вырабатывающих сигнал управления, реализуемый различными исполнительными устройствами. Закон регулирования, заложенный в типовой регулятор, должен быть универсальным, подходящим для широкого класса объектов управления. Выполнение этих требований обеспечивает большую серийность регуляторов, а, следовательно, невысокую цену. Перечисленными свойствами обладают микропроцессорные цифровые ПИД-регуляторы.

Типовые законы регулирования реализуются в регуляторах непрерывного действия, у которых входная и выходная величины непрерывны и определены в любые моменты времени. Усложнение технологического оборудования, повышение требований к качеству управления, а также появление дешевых микропроцессоров обусловили развитие цифровых систем управления. Цифровые системы являются дискретными, их состояние определено в моменты времени, зависящие от шага дискретизации (периода, обусловленного дискретной природой работы микропроцессора). Такие операции, как опрос микропроцессорной системой датчика, выдача управляющего воздействия производятся не непрерывно, а периодически.

На рисунке 88 показана структурная схема цифрового регулятора с аналоговым исполнительным элементом. В состав регулятора входят: микропроцессор, выполняющий алгоритм реализации необходимого зако-

на регулирования (позиционного, ПИД); мультиплексор, переключающий сигналы от нескольких датчиков на вход АЦП (аналогово-цифрового преобразователя, преобразующего непрерывный аналоговый сигнал в цифровой код); демультиплексор, переключающий сигнал от ЦАП (цифро-аналогового преобразователя, реализующего преобразование цифрового кода в непрерывный аналоговый управляющий сигнал) на несколько исполнительных элементов; цифровой задатчик для установки требуемых параметров регулятора.

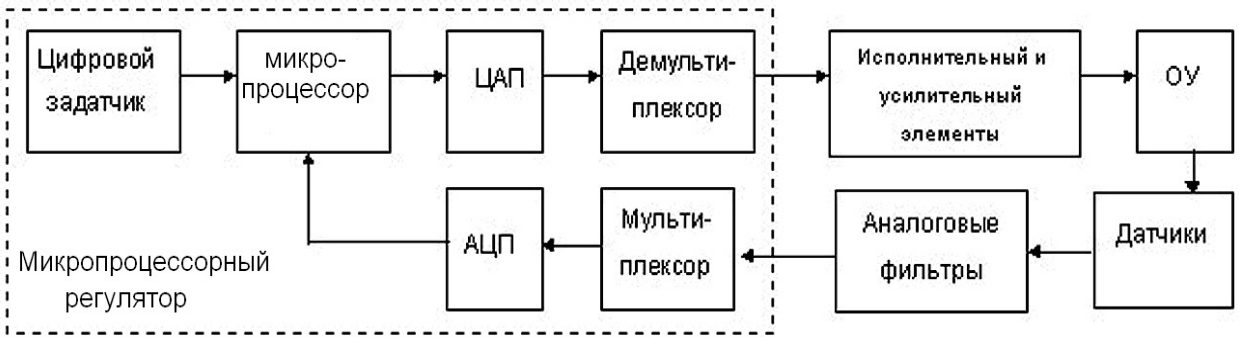


Рисунок 88 – Структурная схема микропроцессорного регулятора

Зачастую быстродействие микропроцессора, АЦП и ЦАП намного превышает необходимое для реализации одноконтурного регулятора, что дает возможность одновременной реализации нескольких контуров регулирования на одном микропроцессорном регуляторе при помощи мультиплексора и демультиплексора сигналов. Применение аналоговых фильтров позволяет уменьшить искажение сигнала в линии связи датчика и микропроцессорного регулятора.

Цифровые алгоритмы управления являются важнейшей составной частью программного обеспечения микропроцессорных регуляторов, которые периодически осуществляют опрос сигналов с датчиков, вычисляют значения управляющих сигналов по заданному закону регулирования, а затем выдают их на исполнительные элементы.

В дискретных системах, управляющих непрерывными объектами, выбор шага дискретизации является важным этапом их проектирования. Внутри шага дискретизации управляющее воздействие остается постоянным и характер переходного процесса определяется динамическими свойствами объекта управления и внешними воздействиями. При слишком большом шаге могут проявляться колебательные составляющие ОУ и высокочастотные возмущающие воздействия. Уменьшение шага облегчает условия устойчивости, снижает уровень пульсаций управляемой величины, дискретный регулятор приближается к непрерывному. Однако, чем меньше шаг, тем больше загрузка микропроцессора.

В реальных условиях при управлении инерционными процессами значение шага дискретизации Δt берется от 1 секунды до нескольких минут

(в газоанализаторах, например, 1 раз в час). При регулировании малоинерционных процессов (например, расхода жидкости) величина Δt может составлять десятые доли секунды. Задержка в прохождении сигнала по каналам аналогового ввода-вывода ничтожно мала (например, для АЦП не более 0,025 миллисекунд) и может не учитываться. Таким образом, цифровой регулятор при правильном выборе шага дискретизации аналогичен непрерывному.

2.2 Универсальный двухканальный программный ПИД-регулятор ОВЕН ТРМ151

В качестве микропроцессорного регулятора в лабораторной работе используется прибор ТРМ 151 компании ОВЕН. ПИД-регулятор ТРМ151 применяется для создания систем управления различного уровня сложности – от контуров локального регулирования до комплексных систем управления объектами с интеграцией в АСУ ТП. Особенности прибора:

- возможность управления двумя независимыми объектами (прибор имеет два встроенных универсальных входа и два выхода);
- возможность расширения входов и выходов путем подключения модулей ОВЕН МВА8 и МВУ8;
- программное управление позиционными исполнительными механизмами: 2-х позиционными (ТЭНы, двигатели); 3-х позиционными (задвижки, краны);
- конфигурирование прибора с помощью программы на ПК.

В ТРМ151 одновременно могут работать 2 канала регулирования, причем они могут принадлежать как одному объекту регулирования, так и двум разным объектам. Всего прибор позволяет создать внутри себя 8 каналов регулирования с различными параметрами.

В ТРМ151 для каждого объекта задаются независимые программы технолога. Для каждого шага программы задаются уставки и параметры регулирования. На разных шагах программы можно регулировать разные входные величины с помощью одного и того же выходного устройства. Условие перехода на следующий шаг программы можно задавать по времени или по достижении определенного значения какого-либо измеряемого или вычисляемого параметра. Также в ТРМ151 можно вызывать программы одну из другой, что позволяет описать технологический процесс практически любой сложности.

В ТРМ151 имеется 12 программ по 10 шагов в каждой. А также ТРМ151 имеет 2 универсальных входа, к которым можно подключать датчики (в том числе разного типа): термопреобразователи сопротивления, термопары, датчики с унифицированным выходным сигналом тока 0(4)–20 мА или напряжения 0–1 В. Время опроса одного канала не более 1 с. Кроме того, ТРМ151 может снимать показания с 8-ми датчиков, подключенных к внешним модулям измерения ОВЕН МВА8.

Регуляторы ТРМ151 могут работать в двух режимах:

- двухпозиционное регулирование (включение-выключение выходных устройств в соответствии с заданной логикой);
- ПИД-регулирование, которое позволяет с высокой точностью управлять сложными объектами. Такой тип регулирования называется непрерывным, т.к. управляющее воздействие может иметь любое значение в допустимом диапазоне. В приборе реализована функция автонастройки коэффициентов ПИД-регуляторов, избавляющая пользователей от трудоемкой операции ручной настройки.

В установленном в лабораторном стенде приборе 2 выходных элемента: реле на максимально допустимый ток 4 А и напряжение 220 В, а также цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), преобразующий вычисленное значение управляющего воздействия в постоянный ток в диапазоне 4–20 мА. Напряжение питания ЦАП 15–32 В постоянного тока, сопротивление нагрузки 0–900 Ом.

ТРМ151 контролирует работоспособность измерителей (проверка на обрыв, замыкание, выход за допустимый диапазон и т.д.) и выходных элементов. При этом ТРМ151 анализирует критичность аварии. Например, на определенном шаге программы технолога произошел обрыв датчика, который не нужен на данном шаге. Прибор в этом случае не останавливает выполнение программы, а только сигнализирует о неисправности, позволяя ее вовремя устранить без прерывания технологического цикла. Однако, если произошла поломка нужного в данный момент измерителя, то ТРМ151 останавливает программу технолога и переводит объект в режим АВАРИЯ. При этом для режима авария все выходные устройства переходят на заранее заданную аварийную мощность, а не просто отключаются.

Кроме того, имеется возможность связать ТРМ151 с другими устройствами посредством компьютерной вычислительной сети промышленного стандарта RS-485 на расстоянии до 1200 м. Такими устройствами могут быть программируемые логические контроллеры (ПЛК), рабочие станции операторов автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) и т.п. На рисунке 89 показаны структурная схема одной из модификаций ТРМ151, иллюстрирующая применение прибора в качестве регулятора температуры и влажности. Для контроля влажности используется психрометрический метод по показаниям «сухого» и «влажного» термометров.



Рисунок 89 – Структурная схема ТРМ151 модификации 8

Перед эксплуатацией ТРМ151 необходимо задать полный набор значений параметров, определяющих работу прибора. Этот набор параметров называется *Конфигурацией*. При производстве прибора ТРМ151 в него записываются заводские значения программируемых параметров. Можно изменить значения только необходимых параметров. Конфигурация записывается в энергонезависимую память и сохраняется в ней при отключении питания.

Конфигурирование ТРМ151 можно производить двумя способами: кнопками на лицевой панели прибора или на персональном компьютере с помощью программы «Конфигуратор ТРМ151». Рекомендуется производить программирование прибора на ПК, так как удобный пользовательский интерфейс программ конфигурирования уменьшает вероятность задания ошибочных значений параметров.

Для отображения состояния ТРМ151, в том числе измеренных датчиками значений, на ПК используется программа OWEN PROCESS MANAGER (OPM). При помощи OPM можно просматривать состояние нескольких приборов (регуляторов, измерителей и т.д.), отображать графики изменения величин во времени и сохранять их в форматах электронных таблиц и графических файлов.

2.3 Лабораторный стенд

Для иллюстрации работы микропроцессорного регулятора используется модель теплового объекта, в котором должна поддерживаться определенная температура. Это могут быть различные печи, сушильные шкафы, обогреваемые помещения и т.п. Упрощенная функциональная схема, иллюстрирующая принцип работы лабораторного стенда показана на рисунке 90.



Рисунок 90 – Функциональная схема лабораторного стенда

В качестве датчика температуры используется термометр сопротивления ТСМ100М, представляющий собой медную проволоку, заключенную в металлический корпус. Преобразование сопротивления проволоки в значение температуры производится ПИД-регулятором ТРМ151, для чего в его конфигурации должен быть указан тип датчика. Выходным элементом ТРМ151 является цифро-аналоговый преобразователь, формирующий сигнал (напряжение постоянного тока), который усиливается тиристорным усилителем, состоящим из прибора ОВЕН БУСТ (блок управления симисторами и тиристорами) и симистора (электронного прибора, выполняющего роль ключа переменного тока), БУСТ расположен на передней части лабораторного стенда и имеет светодиоды индикации текущего значения мощности электрического тока, подаваемой на нагревательный элемент. В качестве нагревателя используются блок керамических резисторов максимальной мощностью 146 Вт при напряжении 56 В переменного тока. Для улучшения равномерности температуры в тепловой модели используется вентилятор на напряжение 12 В постоянного тока. Источник питания стенда обеспечивает напряжения 56 В переменного тока для нагревательного элемента, 12 В постоянного тока для вентилятора и 24 В для обеспечения работы цифро-аналогового преобразователя (формирование управляющего сигнала на тиристорный усилитель).

Для задания конфигурации ТРМ151 и отображения переходных характеристик изменения температуры используется персональный компьютер, подключенный к ТРМ151 через преобразователь интерфейса ОВЕН АС3. Прибор АС3 позволяет связать персональный компьютер через его COM-порт стандарта RS-332C с промышленной сетью передачи данных стандарта RS-485 на основе «витой пары».

3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Включить ПЭВМ и лабораторный стенд. Убедится, что верхний индикатор ТРМ151 отображает значение температуры, приблизительно равное температуре воздуха в аудитории, а второй сверху индикатор отображает надпись «STOP». При существенном превышении отображаемой температуры над температурой воздуха в аудитории открыть дверцу модели теплового объекта регулирования для его охлаждения.
2. Для проведения эксперимента выполнить следующую последовательность действий:
   - запустить программу «Конфигуратор ТРМ151» и выполнить команды **Вперед→ОК→Вперед→Готово**. Установить параметр Конфигуратор ТРМ151→**Регуляторы→Режим работы регулятора→ПИД** (рисунок 71);

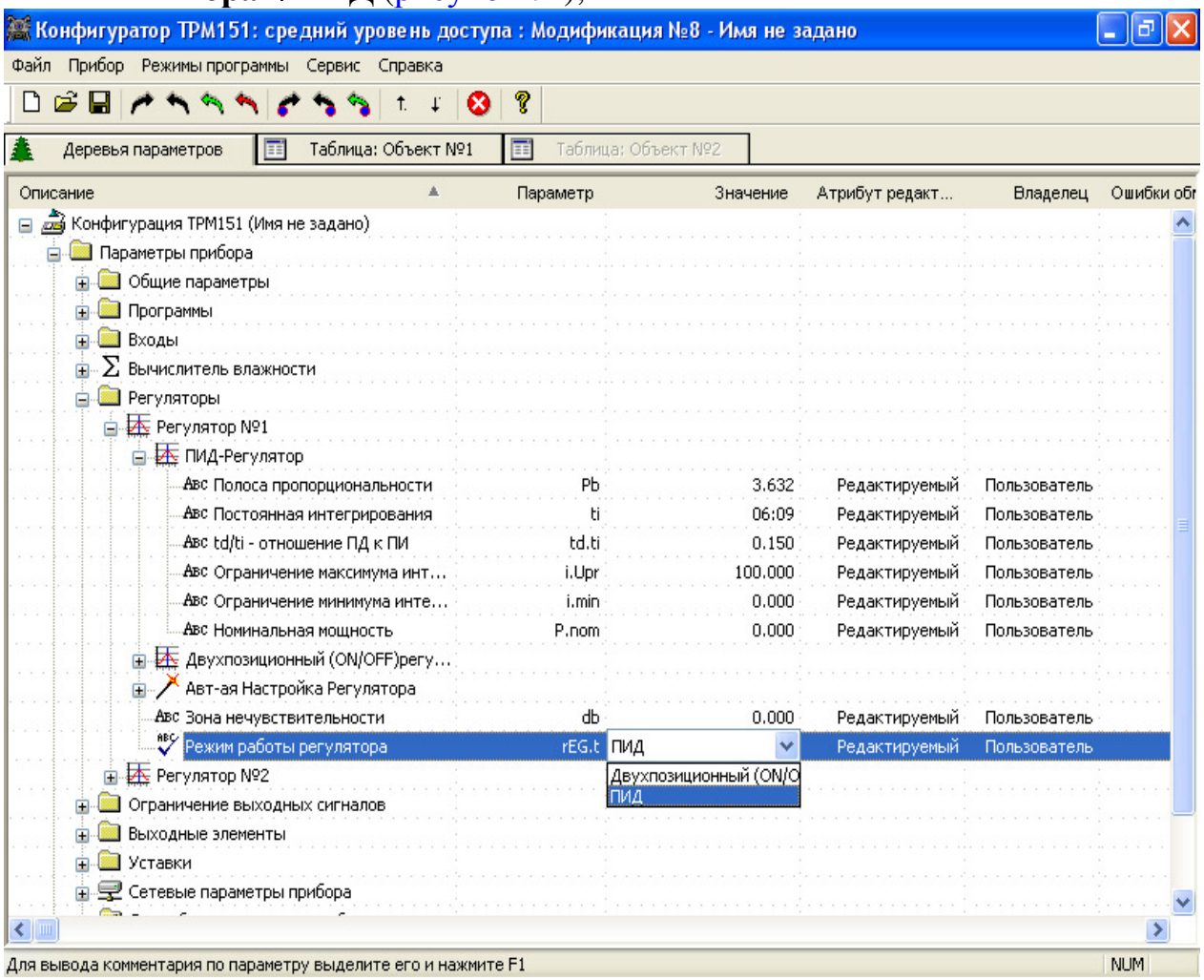


Рисунок 91 – Установка параметров конфигурации ТРМ151

–

- установить параметр Конфигурация ТРМ151→**Уставка в программе №1→Уставка на шаге №1→Уставка регулятора №1→Значение уставки** в соответствие с заданным преподавателем значением температуры $\Theta_{зад}$ в диапазоне 30–40 ^{0}С**. Катего-**

рически запрещается изменять другие параметры конфигурации!

- выполнить команду меню ***Прибор→Записать только измененные***. После успешной записи в ТРМ151 нужной конфигурации выйти и программы «Конфигуратор ТРМ151»;
- запустить файл C:\Owen\трм151.орм, при этом должна загрузится программа «Owen Process Manager» (ОРМ). Запустить процесс связи с ТРМ151 командой меню **Процесс→Запустить процесс**. Убедится, что отображаемые значения температуры на приборе ТРМ151 и в окне программы совпадают;
- щелкнуть мышкой по кнопке  в программе ОРМ и убедится в отображении графика температуры. При закрытой дверце теплового объекта регулирования запустить процесс регулирования нажатием и удерживанием кнопки 

на ТРМ151. Верхний индикатор ТРМ151 должен отображать изменяющуюся температуру внутри теплового объекта регулирования, а второй сверху – заданное в п. 4.3 значение уставки;

3. Наблюдать переходный процесс изменения температуры в тепловом объекте регулирования по графику, отображаемому в программе ОРМ. Также в процессе регулирования должно изменяться управляющее воздействие (мощность, подаваемая на нагревательный элемент), о чем свидетельствует изменение значения «Мощность, %» на индикаторе ТРМ151и количество светящихся светодиодов на приборе БУСТ.
4. После окончания переходного процесса регулирования температуры (сохранение неизменным ее значения в течение 4–5 минут приблизительно равным уставке) записать в отчет текущее отображаемое на ТРМ151 значение температуры $\Theta_{уст}$ и остановить процесс регулирования кнопкой 

на ТРМ151. Остановить процесс связи программы ОРМ с прибором ТРМ151 командой меню **Процесс→Завершить процесс**.
5. Сохранить переходную характеристику, для этого выполнить следующую последовательность действий:
   - вывести график переходного процесса в программе ОРМ командой меню **Вид→График событий.** Командой меню окна «Owen Report Viewer» **Просмотр→Избранные события** открыть диалоговое окно «Выбор событий для просмотра». Установить параметр «Отображать события по времени» и указать период отображения графика приблизительно с момента запуска регулирования (можно определить по графику переходного процесса). При правильном указании периода отображения отобразится переходная характеристика текущего сеанса регулирования;

- командой меню окна «Owen Report Viewer» **Файл→Копирование графика** вызвать диалоговое окно «Копирование графика». Во вкладке «Линии» установить параметры отображения вертикальных и горизонтальных линий, «Показать время» и «Показать значения». Кнопкой «Копирование» сохранить график в графическом файле для дальнейшего использования.

6. Распечатать переходную характеристику и определить по ней время регулирования $t_{рег}$, задавшись допустимой ошибкой регулирования 5%, и величину перерегулирования $\sigma = \frac{\Theta_{max} - \Theta_{уст}}{\Theta_{уст}} 100\%$, где Θ_{max} – максимальное значение температуры в переходном процессе, $\Theta_{уст}$ – ее установившееся значение. Пример определения показателей качества переходного процесса показан на рисунке 92.

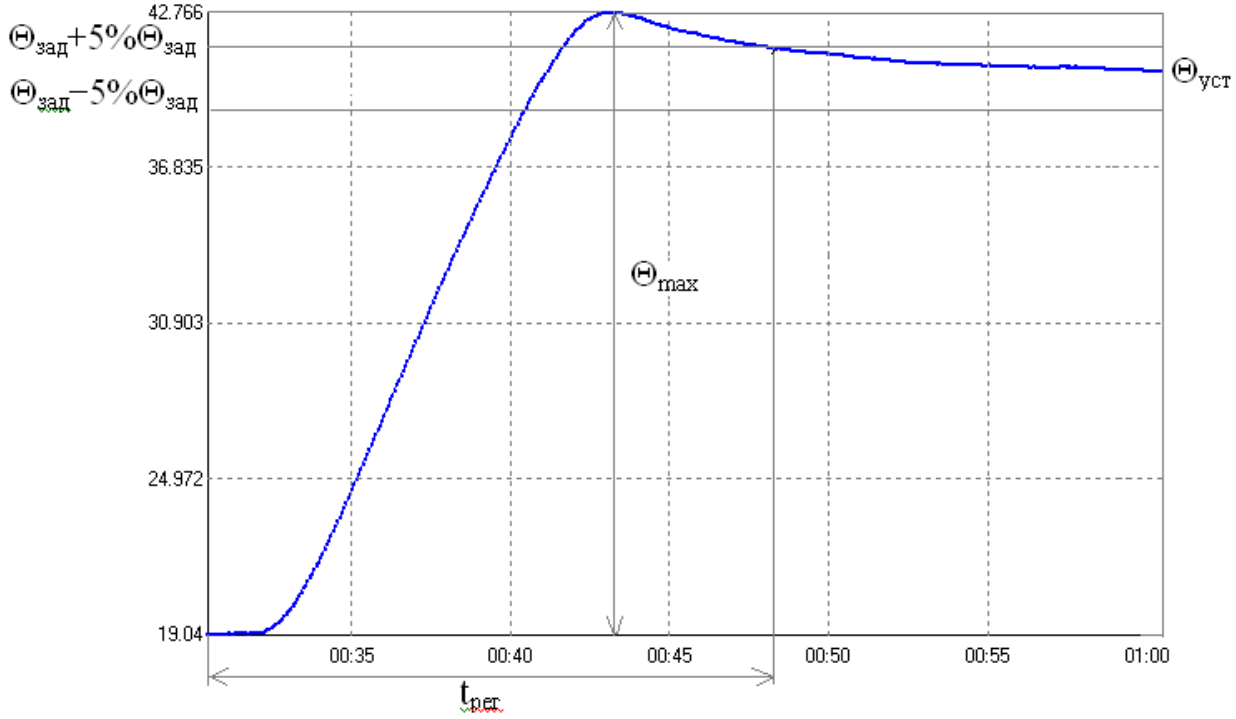


Рисунок 92 – Переходная характеристика

4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать: название и цель лабораторной работы; структурную схему лабораторного стенда с кратким описанием используемых устройств и программ; переходную характеристику с определением показателей качества САР; выводы по работе.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется системой автоматического регулирования?
2. Опишите типовые законы регулирования непрерывных регуляторов.
3. Сколько настроечных параметров имеют ПИД-регуляторы?

4. Из каких элементов состоят цифровые (микропроцессорные) регуляторы непрерывного действия?
5. Какие требования предъявляются к выбору шага дискретизации цифрового регулятора?
6. Опишите типовые характеристики микропроцессорных регуляторов на примере ОВЕН ТРМ 151.
7. Как по переходной характеристике определить показатели качества регулирования?

Лабораторная работа № 9
ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ И НАСТРОЙКА РЕЛЕЙНЫХ САР

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной лабораторной работы является исследование автоколебательных режимов и освоение методики настройки релейных САР на примере микропроцессорного регулятора ОВЕН ТРМ202.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Релейные САР

Системы автоматического регулирования (САР) подразделяются на линейные и нелинейные. К классу нелинейных относятся так называемые релейные системы, в замкнутом контуре которых содержится хотя бы один релейный элемент.

Анализ САР сельскохозяйственного назначения показывает, что большинство из них являются релейными. В отличие от линейных САР релейные системы могут иметь автоколебательные режимы, при которых регулируемая величина изменяется по периодическому негармоническому закону с определенной условной амплитудой и частотой. В некоторых САР автоколебательные режимы нежелательны, а для отдельных систем они являются рабочими. Параметры автоколебаний зависят от динамических свойств линейной части САР, вида и параметров релейного элемента. Соответствующим выбором параметров релейного элемента можно обеспечить необходимый режим работы САР.

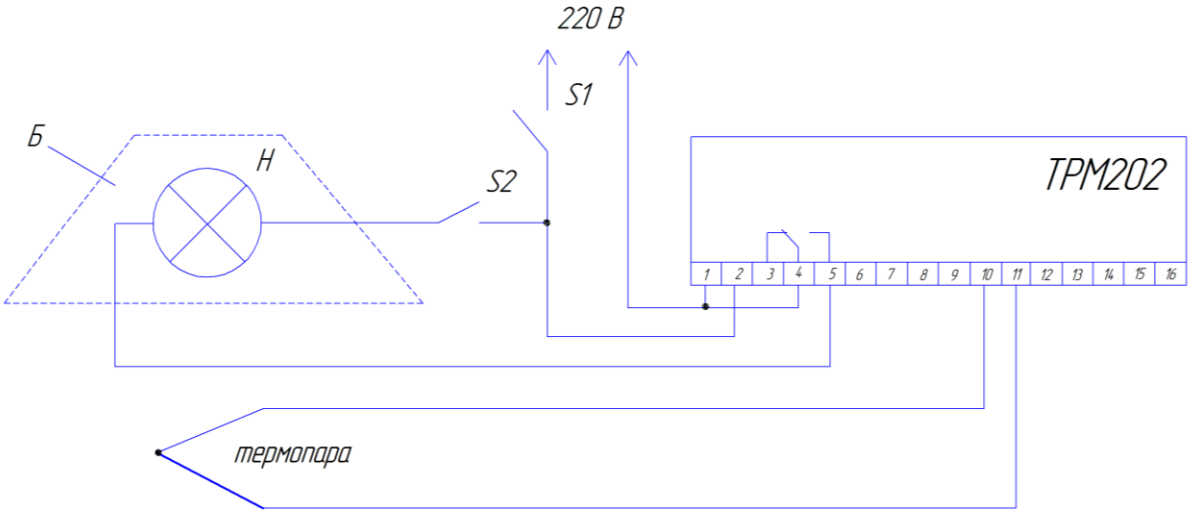
Системы автоматического регулирования с релейными (позиционными) регуляторами широко применяют при автоматизации производства. Это стало возможным благодаря таким их преимуществам, как простота технических способов управления энергетическими потоками, дешевизне, надежности и простоте настройки самих регулирующих устройств.

Рассмотрим сущность релейных САР на примере системы стабилизации температуры воздуха в подзонтичном пространстве электробрудера (рисунки 93, 94). В данной системе релейным элементом является терморегулятор. Объект регулирования (подзонтичное пространство брудера) по каналу регулирующего воздействия и исполнительный орган (нагревательный элемент – лампа накаливания) в динамическом отношении описываются соответственно передаточными функциями

$$W_0(p)=\frac{k_0}{T_0 p+1}, \qquad W_u(p)=\frac{k_u}{T_u p+1},$$

где k_0, k_u – передаточные коэффициенты соответственно объекта регулирования и исполнительного органа;

T_0, $T_и$ – постоянные времени соответственно объекта регулирования и исполнительного органа.



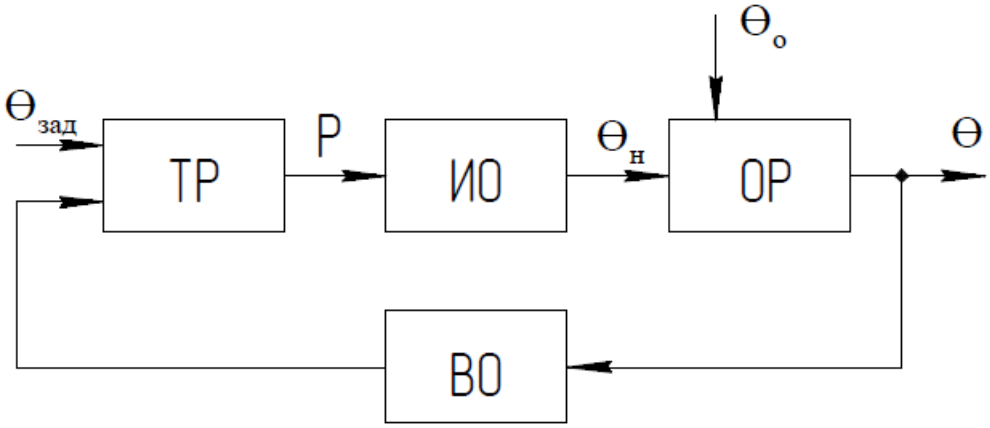
Б – электробрудер; Н – нагревательный элемент

Рисунок 93 – Принципиальная схема САР

В данной системе $T_и << T_0$. В связи с этим постоянной времени исполнительного органа можно пренебречь (приняв $T_и = 0$) и линейную часть САР представить передаточной функцией

$$W_л(p) = W_0(p)W_и(p) = \frac{k_л}{T_0 p + 1},$$

где $k_л = k_0\, k_и$ – передаточный коэффициент линейной части САР.

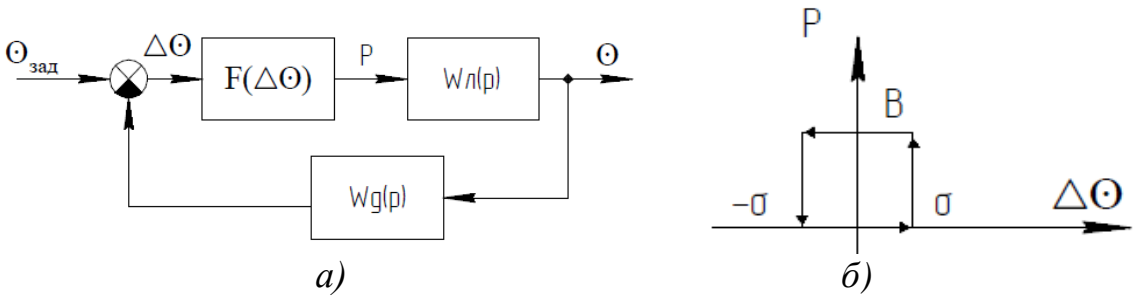


ОР – объект регулирования (подзонтичное пространство брудера);
ИО – исполнительный орган (нагревательный элемент);
ВО – воспринимающий орган (датчик); ТР – терморегулятор; θ – температура воздуха (регулируемая величина); $\theta_н$ – температура нагревательных элементов (регулирующее воздействие); Р – мощность нагревательных элементов; $\theta_{зад}$ – заданная температура; θ_0 – температура окружающей среды (возмущающее воздействие)

Рисунок 94 – Функциональная схема САР

Таким образом, функциональную схему САР, приведенную на ри-

сунке 94, можно изобразить в виде, приведенном на рисунке 95 *а*.

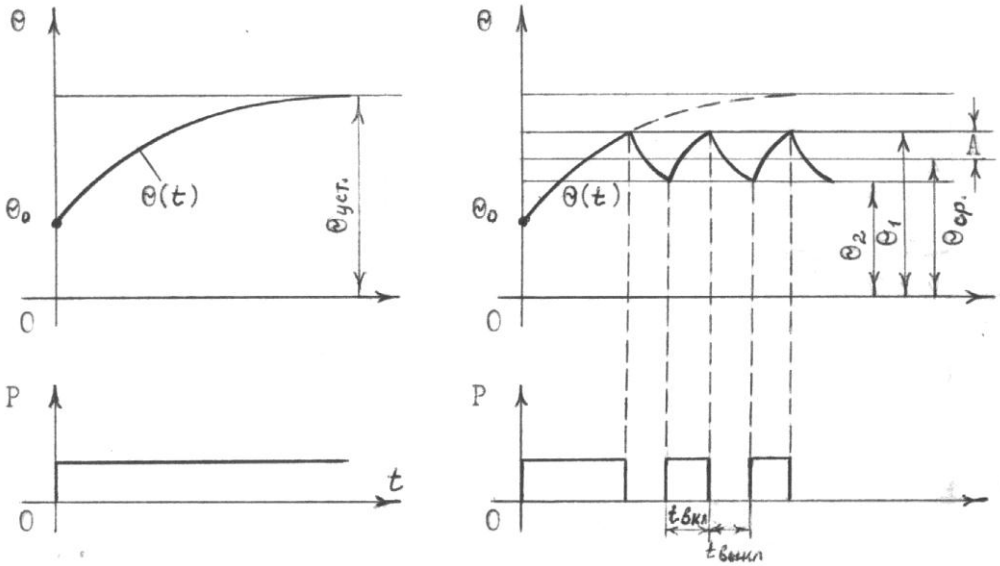


а) *б)*

$\Delta\theta = \theta_{зад} - \theta$ – сигнал рассогласования; $P = F(\Delta\theta)$ – релейная характеристика регулятора

Рисунок 95 – Структурная схема САР без учета возмущающего воздействия (*а*) и релейная характеристика (*б*)

Терморегулятор имеет релейную характеристику, показанную на рисунке 95 *б*. Выходная величина терморегулятора может принимать два значения: $P = 0$ или $P =$ В. Величина σ определяет *зону нечувствительности* регулятора, в которой изменения выходного сигнала не происходит. Такие релейные характеристики называются двухпозиционными. Подавляющее большинство релейных САР сельскохозяйственного значения содержат регуляторы с двухпозиционными релейными характеристиками.



а) *б)*

а – при отсутствии регулятора; *б* – при наличии двухпозиционного регулятора

Рисунок 96 – Графики изменения температуры

На рисунке 96 *а* приведена переходная функция, характеризующая закон изменения во времени температуры θ при скачкообразном изменении мощности нагревательного элемента от нуля до максимального значения. Наличие двухпозиционного регулятора ограничивает процесс нагрева (рисунок 96 *б*). При достижении температуры θ_1 регулятор от-

ключает нагревательный элемент. Снижение температуры до θ_2 вызывает включение нагревательного элемента. То есть значение температуры колеблется относительно среднего значения $\theta_{ср}$ с амплитудой А и частотой

$$\Omega = \frac{1}{t_{вкл} + t_{выкл}} = \frac{1}{T_к},$$

где $T_к = t_{вкл} + t_{выкл}$ – период автоколебаний.

Параметры автоколебаний – *амплитуда* A и *частота* Ω зависят от *зоны нечувствительности* σ. Уменьшение σ приводит к уменьшению амплитуды A и увеличению частоты автоколебаний Ω. Увеличение σ вызывает возрастание амплитуды A и снижает частоту Ω. Большие амплитуды автоколебаний могут отрицательно влиять на протекание технологического процесса, а высокие частоты – на срок службы коммутационных элементов системы.

Зона нечувствительности при настройке релейных САР должна определяться таким образом, чтобы значения амплитуды колебаний отвечали требованиям технологического процесса к величине отклонения регулируемой величины, а частота колебаний удовлетворяла требованиям надежности релейного регулятора и коммутационной аппаратуры (чтобы значение частоты соответствовало паспортному предельно допустимому количеству коммутаций). Однако показанные на рисунке 96 зависимости характерны только для астатических объектов регулирования, у которых время чистого запаздывания равно 0. В релейных автоматических системах с астатическим объектом при наличии запаздывания динамика процесса регулирования несколько отличается от динамики регулирования объекта без запаздывания, хотя также будет наблюдаться режим автоколебаний (рисунок 97).

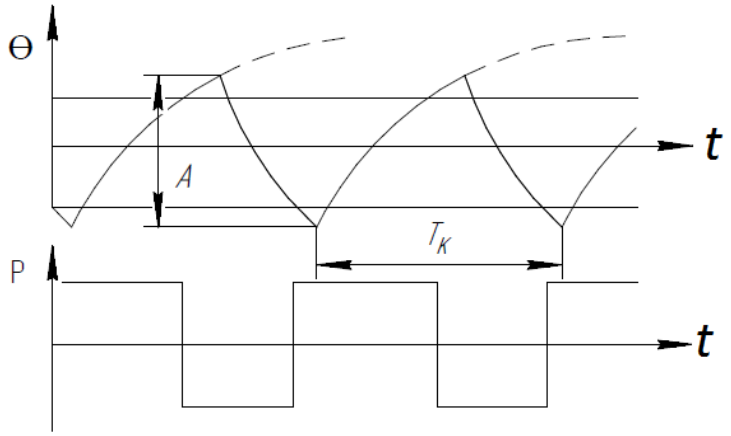


Рисунок 97 – Динамика двухпозиционного регулирования статического объекта с запаздыванием

После прекращения притока вещества или энергии регулируемая величина продолжает увеличиваться еще некоторое время, поскольку имеется запаздывание. Только после истечении этого времени регулируе-

мая величина начинает уменьшаться благодаря оттоку, причем и после появления притока уменьшение будет продолжаться некоторое время. Следует помнить, что наклоны возрастающей и убывающей переходной характеристики процесса двухпозиционного регулирования в общем случае неодинаковы из-за неравноценного влияния притока и оттока на объект и различных передаточных коэффициентов объекта для указанных режимов.

2.2 Описание модели релейной двухпозиционной САР

В качестве модели релейной двухпозиционной САР взята система с тепловым объектом управления. Это обосновано тем, что в сельскохозяйственном производстве имеется большое количество подобных САР. К их числу относятся системы стабилизации температуры животноводческих помещений, брудеров, электрообогреваемых полов и ковриков, водонагревателей, инкубационных камер, парников, теплиц и др. В таких САР используются серийные терморегуляторы, имеющие релейную характеристику, показанную на рисунке 95.

Модель САР выполнена в виде отдельного блока, содержащего металлический зонт с лампой накаливания, имитирующей электробрудер, и измеритель-регулятор ТРМ202. Схема лабораторной установки показана на рисунке 93. Регулируемой величиной в модели САР является температура воздушного пространства под брудером, которая контролируется датчиком регулятора. При достижении температуры порога срабатывания регулятор отключает лампу от сети. При снижении температуры на величину дифференциала $d = 2\sigma$ (рисунок 95 *б*) лампа подключается к сети. Таким образом, процесс регулирования идет в соответствии с графиком, приведенным на рисунке 96.

2.3 Общие сведения об измерителе-регуляторе ТРМ202

Измеритель–регулятор ТРМ202 (в дальнейшем изложении по тексту именуемый «прибор») представляет собой устройство, выполненное на элементах микроэлектроники. Функциональная схема прибора показана на рисунке 98.

Прибор включает в себя:

– два универсальных входных блока (вход 1, вход 2) для подключения датчиков (датчик 1, датчик 2);
– блок обработки данных, предназначенный для цифровой фильтрации, коррекции, выполнения вычислительных операций и формирования релейного закона регулирования посредством логических устройств (ЛУ1, ЛУ2);
– два ключевых выходных устройства (ВУ1, ВУ2) с электромагнитными реле;
– два цифровых индикатора для отображения регулируемых величин и их установок;

– интерфейс RS–485 для подключения прибора к компьютеру.

К измерительным входам прибора можно подключать датчики различных типов. Для измерения температур используют термопары или термопреобразователи сопротивления. Для измерения других физических величин (давления, влажности, расхода, уровня и т.п.) применяют датчики, оснащенные нормирующими преобразователями этих величин в унифицированные сигналы постоянного тока 4–20 мА, 0–20 мА, 0–5 мА или напряжения –50–50 мВ и 0–1 В.

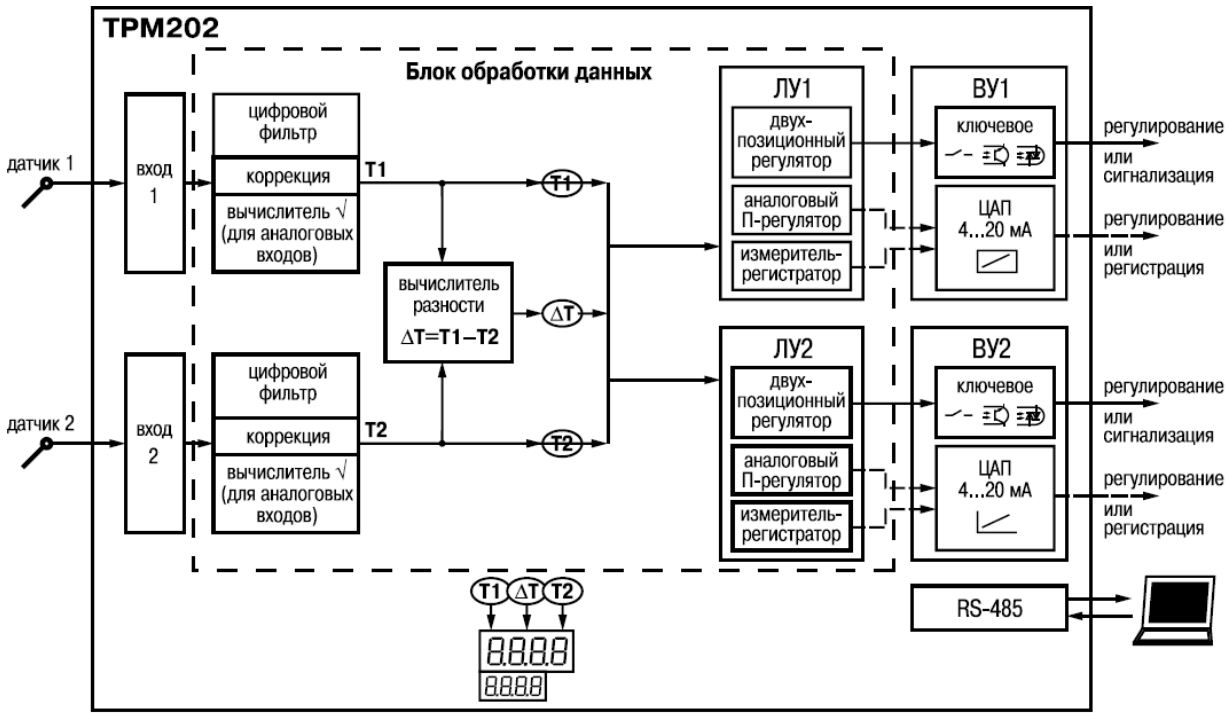


Рисунок 98 – Функциональная схема ТРМ202

Не вдаваясь в подробности и детали физических принципов обработки и преобразования электрических величин в приборе, рассмотрим каждый его блок с точки зрения функционального его назначения. Поскольку прибор имеет два идентичных канала, будем рассматривать принцип его работы применительно к одному из каналов.

Сигнал, полученный от датчика, во входном блоке преобразуется в цифровое значение измеряемой величины. Для исключения влияния случайных помех на измерение контролируемой величины с помощью цифрового фильтра обеспечивается их фильтрация. Это позволяет сгладить входной сигнал и защитить измерительный тракт от единичных и высокочастотных помех.

Для устранения погрешности преобразования входного сигнала самим датчиком и погрешностей, вносимых соединительными проводами, при необходимости получения высокой точности контроля и регулирования, в приборе предусмотрена коррекция, позволяющая смещать статиче-

скую характеристику преобразователя (датчика) в начало координат или изменять ее наклон (крутизну).

Прибор позволяет при необходимости с помощью вычислителя осуществлять контроль и управление технологическим процессом по разности двух величин $\Delta T = T_1 - T_2$.

Сигнал после цифровой фильтрации и коррекции, а при необходимости преобразованный с учетом приведенного выше алгоритма вычитания, поступает на вход логического устройства, построенного на базе компаратора, реализующего двухпозиционный закон регулирования различного типа. С выхода логического устройства сигнал подается на ключевые выходные устройства, выполняющие функции усилителя мощности на электромагнитном реле.

В процессе работы прибора текущие значения измеряемых и регулируемых величин отображаются на двух цифровых индикаторах.

При необходимости прибор можно подключить к компьютеру, что позволяет наблюдать и фиксировать процесс контроля и регулирования во времени, а также реализовать возможности современных информационных технологий применительно к автоматизированным системам управления технологическими процессами (АСУ ТП).

В зависимости от конкретных условий и задач контроля и регулирования выходных величин (координат), характеризующих технологический процесс (объект), необходимые функциональные возможности прибора можно задавать посредством его конфигурирования с клавиш на передней панели или при помощи компьютера через интерфейс RS–485. Выпускается несколько модификаций прибора, отличающихся типом и размерами корпуса (щитовой или настенный) и выходными элементами (электромагнитные реле, транзисторы, оптопары или цифро-аналоговые преобразователи). В макете используется модификация ТРМ202-Щ2РР – щитовой с размерами 96×48×100 мм, два выходных электромагнитных реле.

2.4 Индикация и управление ТРМ202

На рисунке 99 показан внешний вид лицевой панели прибора, на которой расположены элементы, с помощью которых обеспечивается индикация и управление прибором.



Рисунок 99 – Лицевая панель измерителя-регулятора ТРМ202-Щ2РР

Индикация при программировании, а также в рабочем режиме прибора обеспечивается с помощью двух цифровых индикаторов посредством буквенных символов латинского алфавита и десятичных цифр, а также с помощью пяти светодиодов обозначенных ЛУ1, ЛУ2, К1. К2, RS.

Семисегментные диодные элементы индикаторов обеспечивают отображение большинства букв латинского алфавита за исключением некоторых, которые имитируются следующей символикой: k – ; t – ; o –  ; m – ; x – ; v – ; w – .

Верхний цифровой индикатор красного свечения отображает:

– текущее значение измеряемой (контролируемой) величины;

– при программировании надпись  – МЕНЮ и название параметра.

Нижний цифровой индикатор зеленого свечения отображает:

– значение установки;

– при программировании в МЕНЮ название группы параметров и их значения.

Свечения светодиодов означает:

ЛУ1 – на индикатор выводится величина, назначенная на логическое устройство (ЛУ1);

ЛУ2 – на индикатор выводится величина, назначенная на логическое устройство (ЛУ2);

К1 – включено ключевое выходное устройство 1;

К2 – включено ключевое выходное устройство 2;

RS – засвечивается на 1 секунду в момент передачи данных от компьютера.

Кнопки на передней панели прибора предназначены:

 – для увеличения значения программируемого параметра;

 – для уменьшения значения программируемого параметра;

ПРОГ. – для входа в МЕНЮ программирования или для перехода к следующему параметру.

Кроме рассмотренного назначения кнопок используются их комбинации (одновременное нажатие двух или трех кнопок) для входа в специальные режимы работы прибора, которые при выполнении данной лабораторной работы не рассматриваются.

Вывод текущих значений измеренных величин на цифровой индикатор может осуществляться в одном из трех режимов: статическом, циклическом и одновременной индикации.

В статическом режиме на верхнем цифровом индикаторе отображается значение измеренной (вычисленной) величины, назначенной на вход какого-либо логического устройства (ЛУ) (при включении питания прибора всегда ЛУ1). На нижнем индикаторе – значение уставки для этого

ЛУ. При нажатии кнопки ПРОГ. происходит переключение на индикацию соответствующих величин для другого ЛУ.

В циклическом режиме смена этих величин происходит автоматически каждые 6 секунд.

В режиме одновременной индикации на верхнем индикаторе отображается значение величины, измеренной на входе 1, на нижнем – величины, измеренной на входе 2. При нажатии кнопки ПРОГ. происходит переключение в статический режим индикации. Выбор и задание режима индикации осуществляется при программировании прибора.

2.5 Конфигурирование прибора

Параметры прибора задает пользователь при конфигурировании. Они сохраняются при отключении питания в энергонезависимой памяти прибора.

Основные параметры прибора объединены в 5 групп, соответствующие МЕНЮ прибора (рисунок 100).

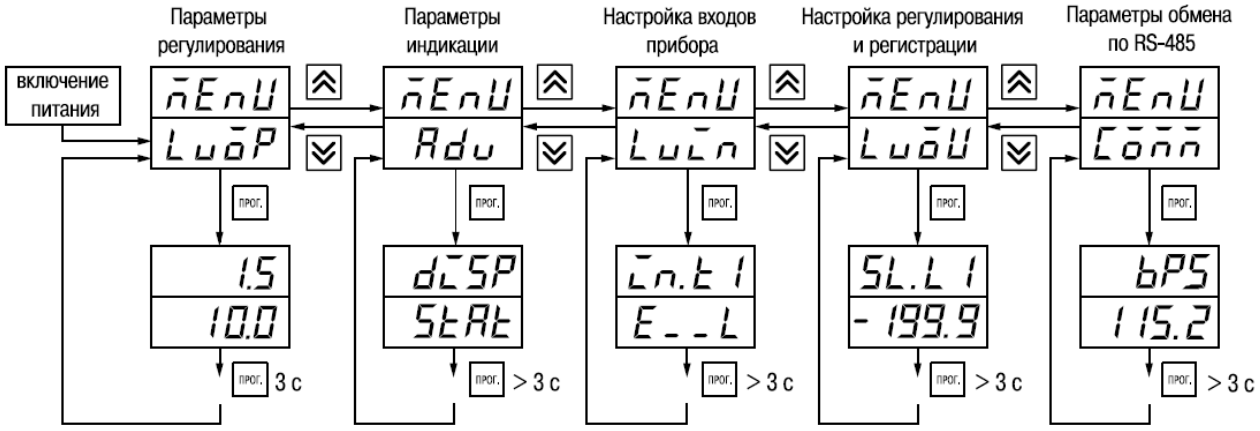


Рисунок 100 – МЕНЮ измерителя-регулятора ТРМ202

При включении питания на индикаторе видны параметры группы LuoU.

Остальные четыре группы содержат следующие параметры:

Adu – параметры настройки индикации;

LuCn – параметры настройки входов прибора;

LuoU – параметры настройки регулирования и регистрации;

Conn – параметры настройки интерфейса RS-485.

Переход между заголовками групп МЕНЮ (nEnU) осуществляется кнопками ⩓ (к следующему) и ⩔ (к предыдущему). Переход к первому параметру каждой группы обеспечивают кратковременным (примерно односекундным) нажатием кнопки ПРОГ., а возврат в заголовок

группы (из любого параметра группы) – примерно трёхсекундным нажатием кнопки ПРОГ.

Внимание! Новое значение параметра записывается в память и прибор будет работать с новым значением параметра только после кратковременного нажатия кнопки ПРОГ. (т.е. при переходе к следующему параметру).

Для перехода в специальные режимы работы прибора используются комбинации кнопок, которые в данной лабораторной работе не используются.

Для изменения уставки используются кнопки и для соответствующего логического устройства. Для записи измененного параметра нужно нажать кнопку ПРОГ.

Конфигурирование прибора осуществляется через МЕНЮ (MEnU) каждой группы параметров, вход в которые обеспечивают длительным нажатием кнопки ПРОГ. (не менее 6 секунд). Первым, после включения прибора и нажатии кнопки ПРОГ. отображается МЕНЮ первой группы параметров LvoP (LvoP).

Дальнейший процесс программирования сводится к последовательному переходу посредством кратковременного нажатия кнопки к МЕНЮ остальных групп параметров и установки в каждом из них значений соответствующих параметров. Рассмотрим последовательность конфигурирования прибора на заданные параметры регулирования только для логического устройства ЛУ1, используемого в данной лабораторной работе.

При помощи кратковременных нажатий кнопки войдите в группу параметров LvoU (LvoU) (рисунок 100), в котором, после кратковременного нажатия кнопки ПРОГ. выполните последовательно все операции по настройке параметров регулирования:

– задайте нижнюю границу уставки компаратора SL.L1 (SL.L1) в пределах диапазона температуры измеряемого с помощью хромель-алюмелевой термопары – 200 – +1300 ^{0}C (так как в данной лабораторной работе измеритель-регулятор используется для температур окружающей среды ориентировочно от 15 до 40 ^{0}C, то за нижнюю границу можно принять любое значение меньше 15 ^{0}C (зададим нижнюю границу 10 ^{0}C);

– задайте верхнюю границу уставки компаратора SL.H1 (SL.H1), с учетом предпосылок, рассмотренных при задании нижней границы уставки, значение верхней границы уставки следует принять больше максимального значения уставки плюс величину дифференциала (зададим верхнюю границу 60 ^{0}C);

– задайте тип логики компаратора для первого ключевого логического устройства ЛУ1 CmP1 (CmP), выбрав один из четырех возможных (0, 1, 2, 3, 4), руководствуясь следующим:

- тип логики 0 – компаратор выключен применяют для использования прибора в режиме измерителя-регистратора;
- тип логики 1 (обратное управление) применяют для управления работой нагревателя;
- тип логики 2 (прямое управление) применяют для управления работой охладителя;
- тип логики 3 (П-образная логика) срабатывание при входе в заданные границы;
- тип логики 4 (U-образная логика) срабатывание при входе pf заданные границы.

В нашем случае необходимо задать тип логики 1:

– установите значение гистерезиса компаратора *Δ(σ)* для ключевого логического устройства ЛУ1 в соответствии с заданным вариантом (двойное значение гистерезиса *2Δ (2σ)* определяет зону нечувствительности, также называемую дифференциалом). Величину гистерезиса пользователь задает исходя из требований к точности процесса регулирования температуры;

– установите временные параметры компаратора - dоn 1 (don1), doF 1 (doF1), ton 1 (ton1), toF 1 (toF1) в соответствии с заданным вариантом;

– установите параметр «Состояние выхода 1 в режиме «ошибка» oEr 1 (oEr1), выбрав один из двух возможных вариантов: oFF (oFF) – выход выключен или on.

Закончив операции по настройке логического устройства ЛУ1 (на верхнем индикаторе должно отобразиться SL.L2 (SL.L2)), после длительного нажатия кнопки ПРОГ. (не менее 6 секунд), вернитесь в МЕНЮ (nEnU) LvoU (LvoU), а затем с помощью кратковременных нажатий кнопки ⌄⌄ перейдите к МЕНЮ (nEnU) LvoP (LvoP); нажмите кратковременно кнопку ПРОГ. и включите прибор в работу.

3 ПРОГРАММА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

При выполнении лабораторной работы необходимо экспериментально исследовать зависимость параметров автоколебаний САР (частоты и амплитуды) от величины дифференциала регулятора $d = 2\sigma$ (гистерезиса) и постоянной времени датчика температуры, а также влияние возмущающих воздействий на процесс регулирования. Для этого необходимо выполнить следующее:

– включать питание лабораторной установки (выключатель S1) и отключить нагреватель (лампу накаливания) при помощи тумблера S2;

– при помощи кнопок на лицевой панели ТРМ202 произвести конфигурирование прибора в соответствии с методикой, описанной в п. 2.5 и заданным вариантом (таблица 3);

Таблица 3 – Исходные данные для конфигурирования ТРМ202

Вариант	Уставка, °С	Тип логики компаратора **CmP1**	Величина гистерезиса, °С **HYS1**	Задержка включения компаратора, с. **don1**	Задержка выключения компаратора, с **doF1**	Минимальное время удержания компаратора во вкл. состоянии, с **ton1**	Минимальное время удержания компаратора в выкл. состоянии, с **toF1**	Состояние выхода в режиме «ошибка» **oEr1**
1	20,2	Установить 1 – обратное регулирование (режим «нагреватель»)	0,2	1	2	1	0	OFF (выкл)
2	25,4		0,4	5	1	2	1	OFF (выкл)
3	19,2		0,5	0	4	2	1	OFF (выкл)
4	27,1		0,8	1	0	4	2	OFF (выкл)
5	34,3		1	2	1	5	23	On (вкл)
6	25,6		1,2	2	3	6	5	On (вкл)
7	26,7		1,3	2	1	7	3	On (вкл)
8	31,8		1,4	2	2	8	4	On (вкл)
9	23,2		1,5	4	4	9	2	On (вкл)

– запустить регулирование, включить тумблером нагреватель и одновременно секундомер, в процессе регулирования температуры фиксировать моменты срабатывания (включения и выключения лампы) в течение 3–4 периодов колебаний;
– отключить нагреватель (лампу накаливания) и произвести увеличение величины гистерезиса на 0,5 °С;
– запустить регулирование, включить тумблером нагреватель и одновременно секундомер, в процессе регулирования температуры фиксировать моменты срабатывания (включения и выключения лампы) в течение 3–4 периодов колебаний;

- изменить постоянную времени датчика и возмущающее воздействие, не прекращая измерений температуры и времени, для этого на датчик температуры положить металлический уголок;
- фиксировать моменты срабатывания (включения и выключения лампы) в течение 3–4 периодов колебаний;
- построить графики зависимости температуры от времени по снятым данным и для каждого графика определить усредненные значения амплитуды A и частоты Ω колебаний (рисунок 96);
- сделать выводы.

4 СОДЕРЖАНИЕ И ФОРМА ОТЧЕТА

Отчет должен содержать схему исследуемой модели САР, экспериментальные графики процесса регулирования температуры, результаты обработки графиков и выводы.

По форме отчет должен отвечать единым требованиям, установленным в институте. Графики, размерности физических величин, условные обозначения и схемы должны соответствовать требованиям Международной системы единиц и действующих ГОСТов.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое релейная САР?
2. Что такое двухпозиционное регулирование?
3. Что такое автоколебательные режимы в релейных САР и какими параметрами характеризуются автоколебания?
4. Как влияют параметры автоколебаний на технологический процесс и надежность регулятора?
5. Как зависит амплитуда автоколебаний от величины дифференциала (гистерезиса)?
6. Как зависит частота автоколебаний от величины дифференциала (гистерезиса)?
7. По каким требованиям задается величина дифференциала при настройке двухпозиционных регуляторов?
8. Какую структуру имеют микропроцессорные двухпозиционные регуляторы на примере прибора ОВЕН ТРМ202?
9. Какие типы логики имеет ОВЕН ТРМ202?
10. Каким образом используется интерфейс связи регулятора с компьютерной сетью?

Лабораторная работа № 10
ПРОГРАММНО-ЗАДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить конструкции, схемы включения и методики настройки программно-задающих устройств.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Общие сведения о программных системах управления

Разомкнутые автоматические системы программного управления реализуют информацию о задаче управления, которая заносится в программное устройство оператором на основании заранее отработанных графиков или технологических карт протекания того или иного процесса. В соответствии с этой информацией программное устройство автоматически управляет технологическим процессом во времени.

Программно-задающие (таймерные) устройства предназначены для управления различными объектами управления по заранее заданной программе. Они чаще всего используются в разомкнутых системах автоматического управления (САУ). Также программно-задающие устройства могут использоваться для изменения уставки регуляторов по заранее известному закону в функции времени. В общем случае функциональные схемы разомкнутых программных систем автоматического управления (рисунок 101) содержат задающий орган – ЗО, программно-задающий орган – ПЗО и преобразующий орган – ПО, усилительный орган – УО, исполнительный орган – ИО и объект управления – ОУ.

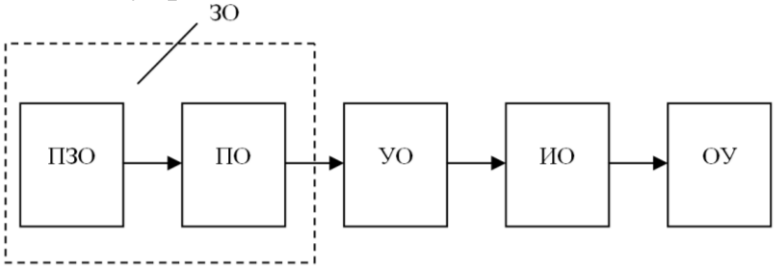


Рисунок 101 – Функциональная схема программной системы управления

Разомкнутые автоматические системы программного управления реализуют информацию о задаче управления, которая заносится в программное устройство оператором на основании заранее отработанных графиков или технологических карт протекания того или иного процесса. В соответствии с этой информацией программное устройство автоматически управляет технологическим процессом во времени.

В настоящее время выпускаются электромеханические и электронные программно-задающие устройства, однако, электронные таймеры

позволяют реализовывать более сложные алгоритмы управления, чем электромеханические.

Программно-задающие органы (ПЗО) в большинстве электромеханических программных устройств выполняются с помощью синхронных электродвигателей, которые обладая жесткой внешней характеристикой, обеспечивают постоянную частоту вращения при колебаниях напряжения питания или момента сопротивления на его валу. Они тем самым гарантируют необходимую точность управления без дополнительных стабилизирующих элементов.

В электромеханических программных устройствах роль преобразующих органов (ПО) выполняют коммутационные контакты, обеспечивающие преобразование угловых перемещений двигателя через кинематические звенья в дискретные электрические сигналы.

Исполнительные органы (ИО), располагаемые обычно вне программных устройств, являются частью агрегата, непосредственно выполняющего технологические операции объекта управления (ОУ).

Если коммутационные контакты программных устройств соответствуют по току и напряжению цепям питания исполнительных органов (ИО), то в системах программного управления усилительные органы (УО) отсутствуют. В противном случае для усиления сигналов коммутационных контактов по мощности необходимы усилительные органы, роль которых в большинстве случаев выполняют контакторы, магнитные или бесконтактные (полупроводниковые) пускатели.

Программные устройства могут использоваться для автоматического управления различными поточными линиями (кормораздачи, навозоудаления), насосными установками, теплогенераторами, освещением и другими объектами, работающими циклически.

2.2 Электромеханические программно-задающие устройства

2.2.1 Реле времени 2РВМ

Программное реле времени 2РВМ предназначено для автоматического управления двумя независимыми электрическими цепями, путем замыкания и размыкания этих цепей по суточным программам. Задание программ осуществляется ввертыванием штифтов в соответствующие резьбовые отверстия программного диска, вращение которого обеспечивает пружинный двигатель с автоматическим подзаводом.

Принцип работы реле заключается в следующем (рисунок 102). На суточной оси 8 часового механизма вращается программный диск 6, управляющий штифтами 25 и работой двух кулачков 21, приводящих в действие выходные контакты 19 и 20. Пружинный двигатель 10 часового механизма приводит во вращение минутную ось 4 и суточную ось 8. Угловая скорость осей регулируется приставным часовым механизмом 1 через зубчатые редукторы 2 и 9. На оси 4 фрикционно насажен минутный

диск 5, устанавливаемый по указателю 3. На ось 8 фрикционно насажен программный диск 6 с двумя временными шкалами, который устанавливается по указателю 7.

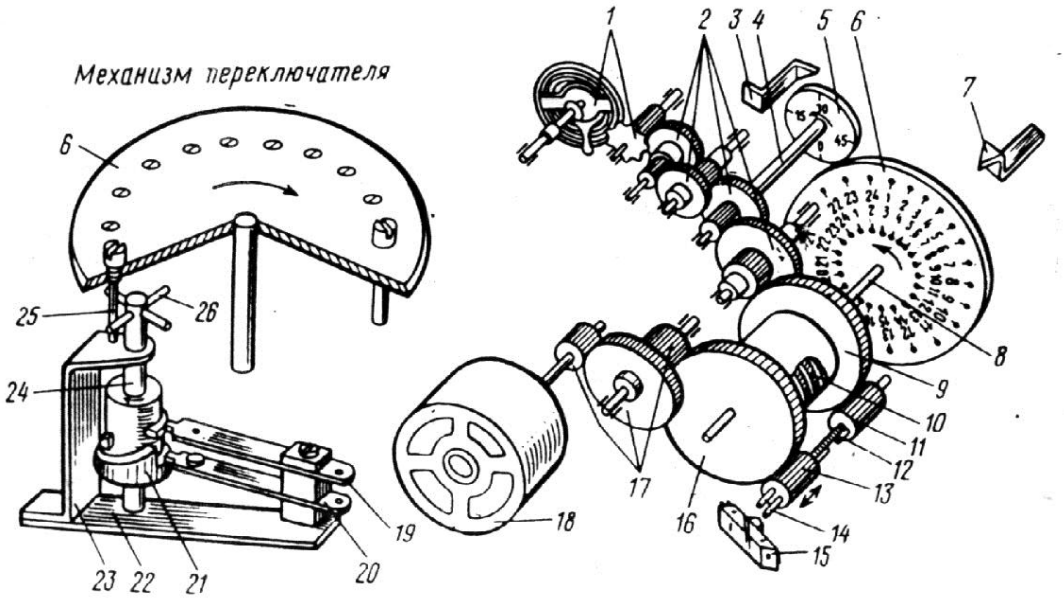


Рисунок 102 – Кинематическая схема реле 2РВМ

Автоматический подзавод пружины часового механизма осуществляется от электродвигателя 18 через зубчатую передачу 17, 16. Управление электродвигателем обеспечивается винтовым дифференциальным механизмом 11–14, который периодически включает и выключает микровыключатель 15 в цепи электродвигателя 18.

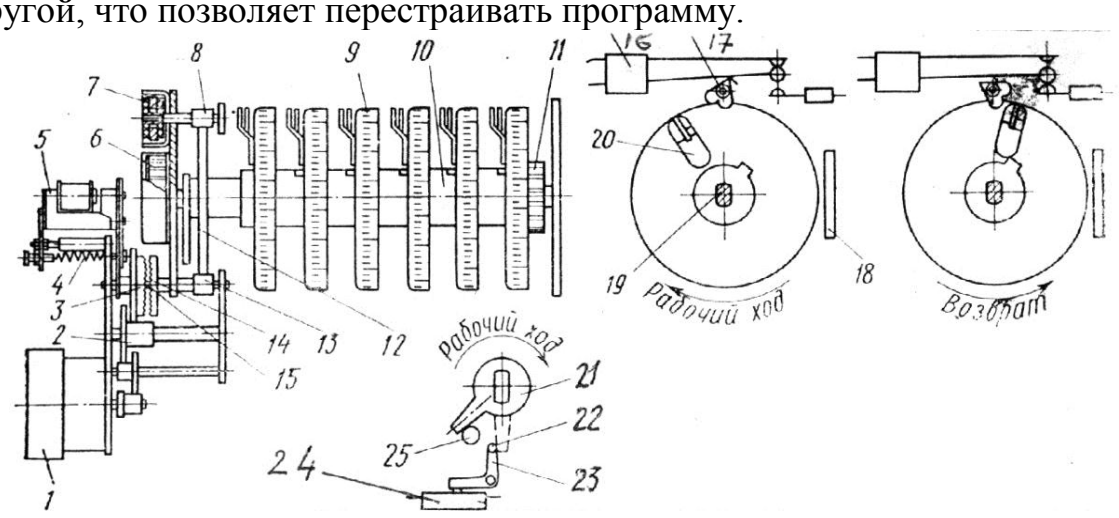
Каждая из программ задается посредством штифтов 25, расположенных на соответствующей окружности программного диска. Считывание программы осуществляется звездочкой 26 кулачкового механизма 21–24, который управляет контактом 19, 20. Штифт 25 при вращении программного диска поворачивает кулачковый механизм, который производит скачкообразное замыкание или размыкание контактов19 и 20, не зависящее от скорости кулачкового барабана.

2.2.2 Программное реле времени ВС-10

Реле ВС-10 предназначено для получения временных регулируемых программ в схемах автоматического управления стационарными установками. Реле ВС-10 выпускаются 8 модификаций. Наименьшую выдержку времени имеет реле ВС-10-31 (от 2 до 60 с), а наибольшую – реле ВС-10-38 (от 1 до 24 ч).

Реле ВС-10 представляет собой электромеханическое устройство с приводом от синхронного двигателя (рисунок 103). Принцип работы реле заключается в том, что вращающийся двигатель посредством кинематических звеньев воздействует на выходные контакты через определенные, заранее устанавливаемые интервалы времени.

Вращение от синхронного двигателя I (рисунок 103) передается через понижающий редуктор 2 диску 3 сцепления, свободно сидящему на оси 15. При включении электромагнита 5 диск 3 входит в зацепление с диском 14, который жестко соединен с трибкой 13. Вращение от диска 14 передается шестерне 12, жестко закрепленной на главной оси 19, на которой расположены шкалы 9. Набор шкал стягивается зажимной гайкой 11. Если гайка отпущена, шкалы могут поворачиваться одна относительно другой, что позволяет перестраивать программу.



1 – синхронный двигатель; 2 – редуктор; 3, 14 – диск сцепления; 4 – пружина; 5 – электромагнит; 6 – возвратная пружина; 7 – центробежный тормоз; 8, 10 – втулки; 9 – шкала; 11 – зажимная гайка; 12 – шестерня; 13 – трибка; 15 – ось сцепления; 16 – контактная система; 17 – кулачок; 18 – визир; 19 – главная ось; 20 – упор; 21, 23 – рычаги, 22 – палец; 24 – конечный выключатель; 25 – неподвижный упор

Рисунок 103 – Кинематическая схема реле ВС-10-32

В зависимости от выдержки времени укрепленные на шкалах упоры 20 оказываются на разных расстояниях по отношению к кулачкам 17. Чем меньше уставка времени для данной шкалы, тем ближе расположен упор к кулачкам, и тем раньше произойдет переброс кулачка 17. При перебросе кулачка 17 от упора 20 переключается контактная система 16. Шкалы на главной оси располагаются между втулками, которые имеют выступы, позволяющие вращать шкалу в пределах оцифрованных делений и препятствующие перебрасыванию кулачка при установке выдержки времени. Выдержка времени устанавливается по шкале 9 и визиру 18 таким образом, чтобы против стрелки на визире находилось требуемое деление шкалы. После отработки программы вращение главной оси со шкалой должно быть прекращено. Это достигается включением обмотки двигателя через собственный размыкающий контакт или через размыкающие контакты других аппаратов, которые управляются контактами реле ВС-10.

Для предотвращения поломок механизма в случае неисправности схемы реле имеет механическую блокировку. В начале работы реле рычаг 21, жестко закрепленный на главной оси 19, прижат к неподвижному упо-

ру 25 пружиной 6. В конце рабочего хода рычаг 21 посредством рычага 23 отключает выключатель 24 цепи питания двигателя.

Механизм реле находится в заведенном состоянии до тех пор, пока включена обмотка электромагнита 5. Возврат реле в исходное положение происходит после отключения электромагнита 5. При этом диск 3 сцепления выводится из зацепления с диском 14, а возвратная пружина 6 возвращает главную ось 19 со шкалами 9 в исходное положение. Для смягчения удара при возврате реле имеет центробежный тормоз 7, который приводится во вращение через трибку 13 от шестерни 12.

2.3 Электронные программно-задающие устройства

2.3.1 Двухканальный таймер реального времени ОВЕН УТ1-PiC

Календарный таймер УТ1-PiC предназначен для автоматического включения и выключения исполнительных механизмов в заданный момент времени. Применяется для управления освещением в теплицах, инкубаторах, уличным освещением, а также в технологических процессах, где время включения и выключения оборудования связано с календарной датой или временем суток. Основные технические характеристики УТ1-PiC:

- функция автоматического перевода часов на зимнее время;
- автоматическое включение и выключение исполнительных механизмов в заданный момент времени;
- две независимые программы управления двумя выходными реле, до 70 пар команд в каждой;
- задание периодичности исполнения для каждой команды: ежегодно, еженедельно или ежедневно (в порядке убывания приоритета);
- коррекция выполнения команд по восходу и заходу солнца, в зависимости от географической широты местности;
- возможность подключения внешних устройств блокировки команд;
- индикация текущего времени и даты программирования кнопками на лицевой панели прибора;
- сохранение заданных параметров при отключении питания;
- защита параметров от несанкционированного доступа.

Логические устройства (ЛУ) УТ1-PiC синхронизированы с часами и служат для формирования команд включения-выключения выходных реле (рисунок 104). УТ1 имеет два выходных реле 8 А 220 В для управления исполнительными механизмами. Пользователь может задать 2 независимые программы для двух логических устройств.

Программа каждого ЛУ включает в себя до 70 пар команд, задающих время включения и выключения выходных реле. Для каждой команды пользователь может задавать периодичность ее исполнения:

- ежедневное – каждый день в указанное время;
- еженедельное – в указанный день недели;
- ежегодное – в указанный день года, например, особые режимы для праздничных дней.

При этом ежегодные команды имеют высший приоритет исполнения, т.е. в указанный день года данная команда будет исполняться вместо еженедельной или ежедневной. В свою очередь, еженедельная команда имеет приоритет над ежедневной.

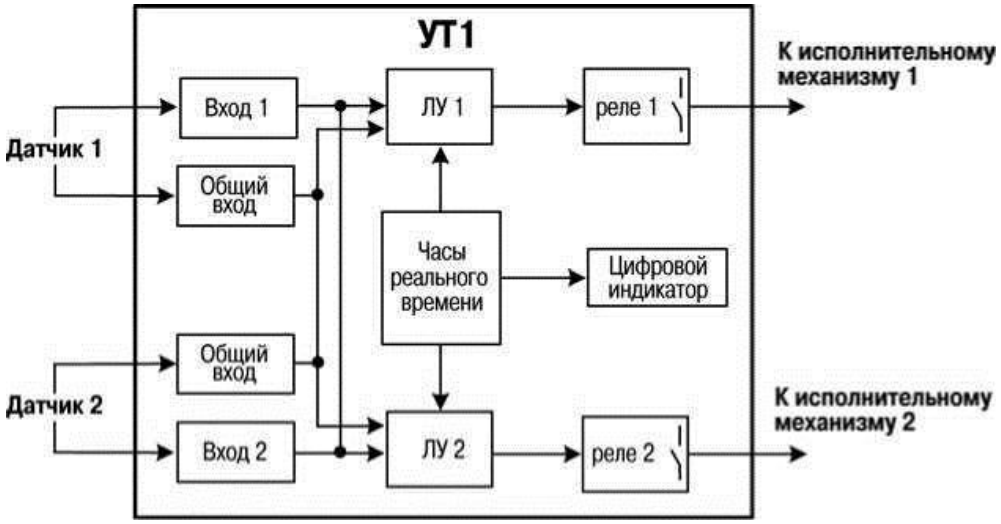


Рисунок 104 – Функциональная схема УТ1-PiC

Каждая команда программы может быть заблокирована с помощью внешнего устройства, подключенного к управляющему входу (1 или 2). Ко входам блокировки могут быть подключены механические контакты, кнопки, герконы, а также оптические, индуктивные или емкостные датчики, имеющие на выходе транзисторные ключи n-p-n-типа.

Перед началом работы необходимо задать следующие параметры:

- параметры работы каждого логического устройства;
- опорную дату (дату начала работы);
- географическую широту местности для коррекции по восходу и заходу солнца.

В таймере имеется два логических входа, используемые совместно обоими каналами таймера, что позволяет поставить условие выполнения команды в зависимость от внешних событий. В каждой команде можно запрограммировать ожидаемое состояние этих входов (замкнутое или разомкнутое). В момент действия команды несоблюдение заданного состояния логических входов приводит к выключению реле. К логическим входам в качестве датчиков могут быть подключены: механические контакты, кнопки, герконы, а также оптические, индуктивные или емкостные датчики, имеющие на выходе транзисторные ключи n-p-n-типа.

На лицевой панели прибора, внешний вид которой представлен на рисунке 105, расположены четырехразрядный светодиодный цифровой индикатор и единичные светодиодные индикаторы, служащие для отображения текущей информации о параметрах и режимах работы прибора.

Кроме того, здесь же расположены три кнопки, предназначенные для управления прибором в различных режимах его работы.

Цифровой индикатор в режиме «Регулирование» отображает значение текущего времени, дня недели или календарного числа; в режиме «Программирование» – значения кодов и команд. Светодиоды «**К1**» и «**К2**» отображают состояние реле каналов 1 и 2 (включенный светодиод соответствует включенному состоянию реле). Светодиоды «**ДЕНЬ**», «» (время) и «**ДАТА**» отображают принадлежность величины, отображаемой на цифровом индикаторе: к дням недели, времени или датам.



»	При нажатии и удержании кнопки в режиме РАБОТА на индикатор выводятся календарное число и месяц года
«	При нажатии и удержании кнопки в режиме РАБОТА на индикатор выводится порядковый номер дня недели – 1 (понедельник), 2 (вторник) и т.д., а также две последние цифры года. В режиме ПРОГРАММИРОВАНИЕ кнопкой циклически меняют содержимое выделенного разряда
ПРОГ.	Кнопка предназначена для входа в режим ПРОГРАММИРОВАНИЕ, выхода из него и перемещения по строкам программы

Рисунок 105 – Элементы индикации и управления УТ1-PiC

На рисунках 106, 107 показана процедура действий по установке часов и программирования каналов. Светодиоды «**ВКЛ**» и «**ВЫКЛ**» отображают задание времени включения (горит светодиод «ВКЛ») и времени выключения (горит светодиод «ВЫКЛ») реле.

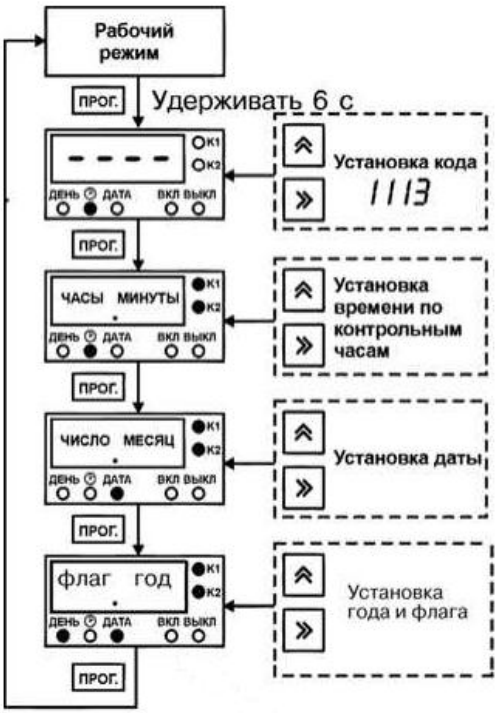


Рисунок 106 – Процедура установки часов

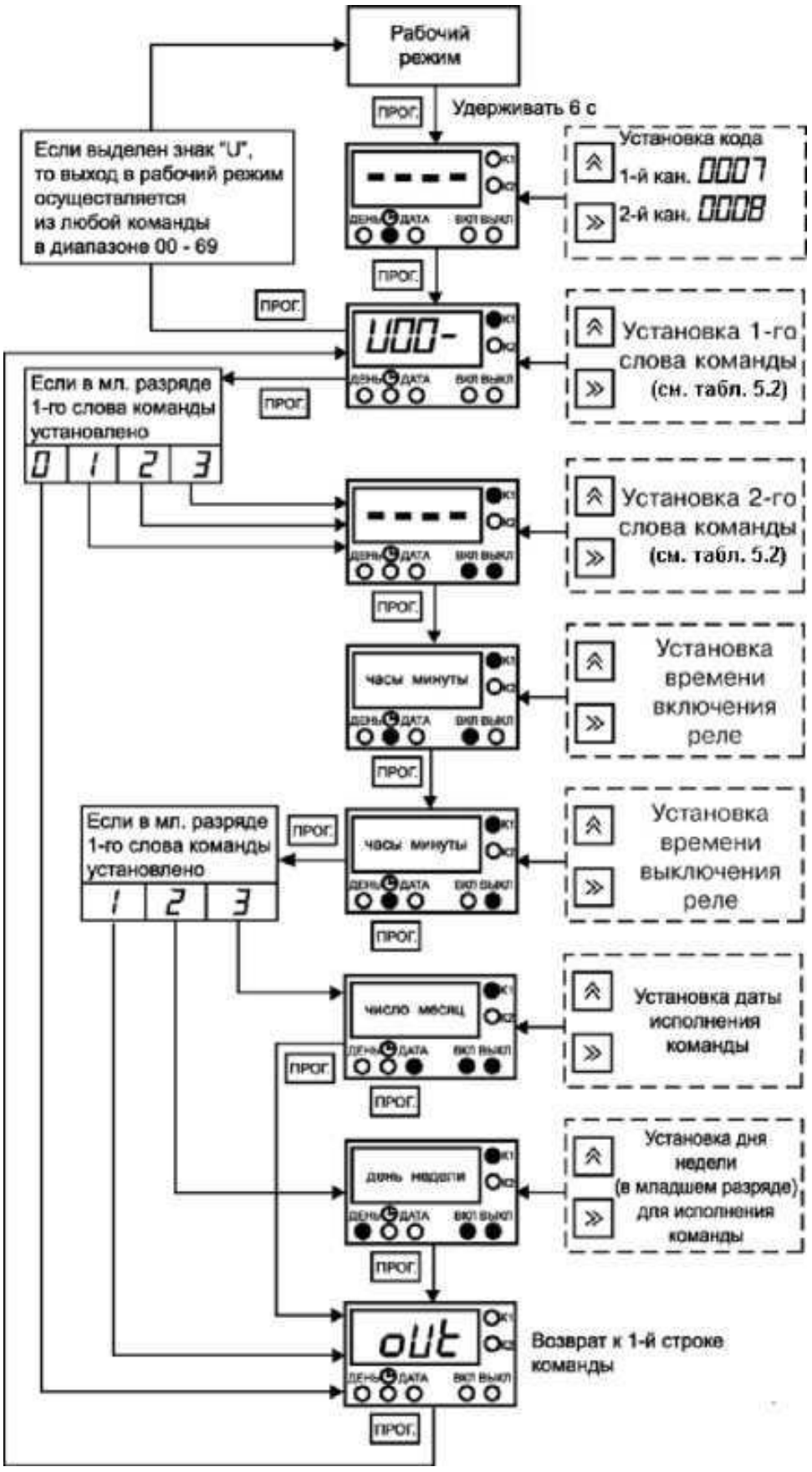


Рисунок 107 – Процедура программирования каналов

2.3.2 Универсальное двухканальное реле времени ОВЕН УТ24

Универсальное двухканальное реле времени УТ24 предназначено для включения и выключения нагрузки по заданной оператором программе. Применяется в качестве таймера, устройства задержки включения или формирователя последовательности импульсов, длительность которых задается пользователем.

Функциональные возможности реле времени ОВЕН УТ24:

- запуск программы по команде оператора или подаче питания на прибор (без привязки к календарному времени);
- два независимых таймера для формирования двух независимых программ управления исполнительными механизмами;
- две программы из конечного и бесконечного числа циклов по 1–30 шагов (каждый шаг задает включение-выключение исполнительного механизма);
- подключение трех внешних устройств для запуска, остановки, временной блокировки или сброса программы таймера;
- индикация времени, числа циклов и шагов, оставшихся до окончания программы;
- программирование кнопками на лицевой панели прибора;
- сохранение текущих значений и параметров программы при отключении питания;
- защита параметров от несанкционированного доступа.

Функциональная схема УТ24 приведена на рисунке 108. Прибор имеет три входа для подключения управляющих сигналов, два независимых таймера для отсчета временных интервалов и селектор входов для коммутации входов прибора на входы таймеров. Каждый таймер имеет свое выходное устройство, которое в зависимости от модификации прибора может представлять собой либо реле, транзисторную оптопару, или оптосимистор.

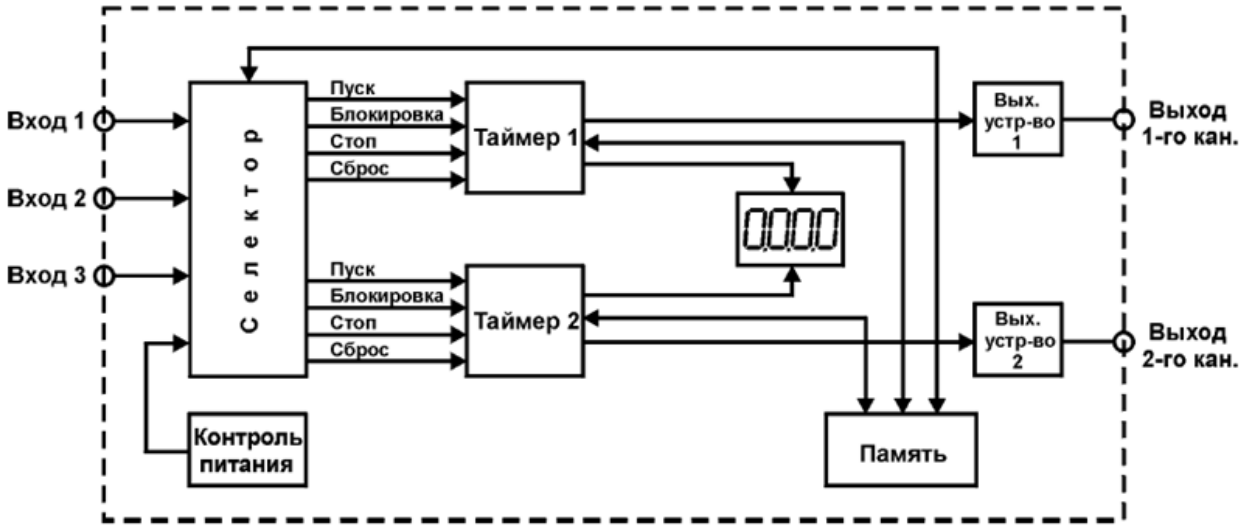
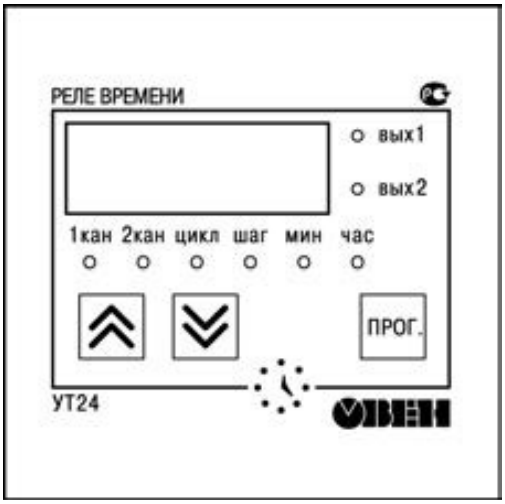


Рисунок 108 – Функциональная схема УТ24



ПРОГ.	Кнопка предназначена для входа в режим просмотра и установки рабочих параметров, для перехода к установке значения параметра после его выбора, а также для записи нового установленного значения в энергонезависимую память прибора и выхода в режим «Работа»
⌃⌃	Кнопка предназначена: – в режиме «Работа» – для переключения индикации с первого таймера на второй и обратно; – в режиме «Программирование
⌄⌄	Кнопка предназначена в режиме «Работа» для переключения формата выводимых на цифровой индикатор значений временных интервалов, а также для просмотра числа шагов, оставшихся до конца цикла, и количества циклов, оставшихся до конца программы

Рисунок 109 – Элементы индикации и управления УТ24

2.4 Краткое описание лабораторной установки

Лабораторная работа по изучению программных устройств выполняется с использованием специальных лабораторных стендов, на которых установлены: реле 2РВМ, ВС-10, выключатель освещения ПРО-68-11 (без корпуса), автотрансформаторы, вольтметры, тумблеры и наборы сигнальных ламп для имитации объектов управления; двухканальный таймер реального времени УТ1-PiC, универсальное двухканальное реле времени УТ24. Стенды включается с помощью автоматического выключателя с флажковым ручным приводом. Для сигнализации о включении стендов имеются сигнальные лампы, расположенные над выключателями. Помимо этого на рабочем месте дополнительно имеются: контактные часы фирмы «Ганц» и программное реле времени ВС-43.

3 ПРОГРАММА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с конструкцией и особенностями лабораторных стендов.
2. Изучить конструкцию и принцип действия программных устройств, рассмотренных в п. 3.
3. Для реле ВС-10 или ВС-43:
   – собрать схему, приведенную на рисунке 110;
   – для реле ВС-10 отпустить зажимную гайку так, чтобы любой диск со шкалой можно было свободно (без значительных усилий) вращать ру-

кой, после этого выставить уставки времени согласно варианту, заданному преподавателем (таблица 4);

– при испытании ВС-43 по заданию преподавателя выставить уставки времени на шкалах для реле с пределом от 1 до 60 с по таблице 5, а для реле с пределом от 1 до 60 мин по таблице 6, для чего следует правой рукой от себя вращать соответствующий диск со шкалой, а левой – придерживать шестеренку.

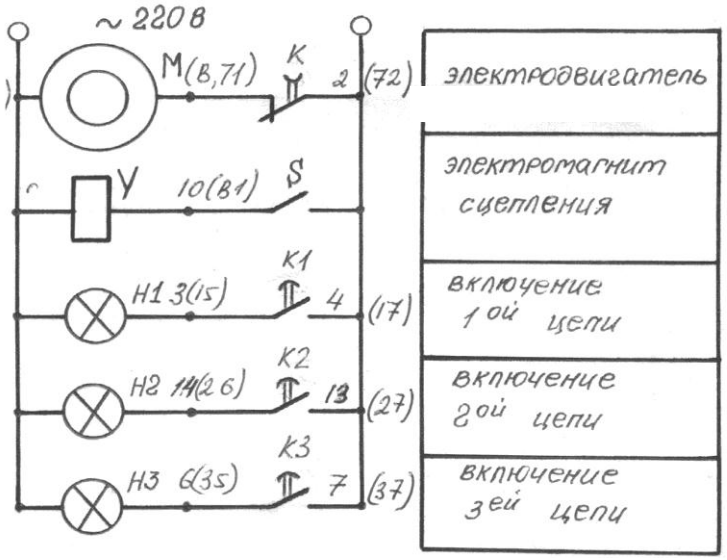


Рисунок 110 – Схема испытания реле ВС-10 или ВС-43: номера без скобок относятся к реле ВС-10; номера в скобках относятся к реле ВС-43

Таблица 4 – Варианты программ для реле ВС-10

Уставки на шкалах, с	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1-я шкала	30	40	45	35	50	25	51	32	60	57
2-я шкала	60	70	75	80	90	55	105	85	110	103
3-я шкала	120	100	110	150	170	130	165	135	175	108

Таблица 5 – Варианты программ для реле ВС-43 с пределом от 1 до 60 с

Уставки на шкалах, с	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1-я шкала	15	18	14	10	20	17	25	13	16	19
2-я шкала	27	36	28	25	40	35	45	30	31	34
3-я шкала	51	46	45	55	59	57	58	52	54	49

Таблица 6 – Варианты программ для реле ВС-43 с пределом от 0 до 60 мин

Уставки на шкалах, мин	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1-я шкала	5	3	2	1	6	4	7	8	2	3
2-я шкала	7	5	4	3	8	6	9	1	5	7
3-я шкала	10	7	6	5	11	9	12	15	8	13

4. После проверки схемы и заданных уставок преподавателем подать напряжение на схему и тумблером S включить реле.
5. С помощью секундомера или часов зафиксировать фактическое время срабатывания реле по каждому каналу, сравнить с заданными уставками и оценить погрешность.
6. Изучить конструкцию и принцип действия электронных программно-задающих устройств (п. 4).
7. Собрать схему, показанную на рисунке 111.

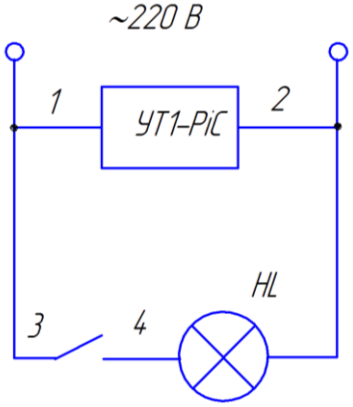
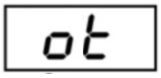


Рисунок 111 – Схема подключения УТ1-РіС

8. Установить на часах УТ1-РіС время 17:00, для этого использовать процедуру (см. рисунок 106):
   - нажать кнопку ПРОГ. и удерживать ее 6 с до появления на табло - - - -;
   - клавишами ≫, ≪ установить код 1113 и нажать клавишу ПРОГ.;
   - клавишами ≫, ≪ установить время 1700 и нажать клавишу ПРОГ.;
   - клавишами ≫, ≪ установить текущий день недели и последние цифры года и нажать клавишу ПРОГ. для перехода в рабочий режим.
9. Ввести программу в канал 1, включающую лампу с 17:15 до 17:17 и с 17:20 до 17:21. Для этого выполнить следующие действия:
   - нажать кнопку ПРОГ. и удерживать ее 6 с до появления на табло - - - -;
   - клавишами ≫, ≪ установить код 0007 и нажать клавишу ПРОГ. На табло должно появиться 1-е слово команды под номером «00» – «U.00.1». Если это не так, то установить в последнем разряде цифру «1» – «U.00.1», это означает, что команда теперь входит в программу для ежедневного использования;

– нажать кнопку ПРОГ. На табло появится 2-е слово программы. Установить во всех разрядах табло значки «-» (). Это означает, что в данной команде не используются логические входы и не задается коррекция по восходу солнца;
– нажать кнопку ПРОГ. и задать время включения реле в данной команде (17.15);
– нажать кнопку ПРОГ. и задать время выключения реле в данной команде (17.17);
– нажать кнопку ПРОГ., должно появиться сообщение  – это означает, что команда занесена в память;
– нажать кнопку ПРОГ., снова должно появится первое слово команды – «U.00.1». Для занесения следующей команды на включение-выключение лампы набрать ее номер «01» и установить в младшем разряде «1» – «U.01.1».
– установить время включения-выключения реле с 17.20 до 17.21 в соответствии с описанной выше процедурой;
– после ввода программы установить курсор на знак «U» и нажать кнопку ПРОГ., при этом устройство перейдет в рабочий режим.

10. Убедитесь, что включение-выключение лампочки происходит по заданной программе. В случае необходимости повторите описанные действия для проверки и коррекции программы.

4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать схемы, результаты испытаний программных устройств, выводы по работе и пример использования одного из программных устройств для автоматизации технологического процесса применительно к сельскохозяйственному производству.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков принцип работы разомкнутых САУ?
2. Что является входом и выходом разомкнутых САУ?
3. Какова функциональная схема разомкнутых программных САУ?
4. Для управления какими технологическими процессами сельскохозяйственного производства используются программные устройства ?
5. Какова конструкция реле времени 2РВМ и как оно работает?
6. Какова конструкция реле ВС-10 и как оно работает?
7. Как настраивается реле 2РВМ ?
8. Как настраивается реле ВС-10?

9. В чем отличие электронных программно-задающих устройств от электромеханических?
10. Каковы преимущества и недостатки электронных программно-задающих устройств в сравнении с электромеханическими?
11. Каковы конструкция и основные возможности УТ1-РiС?
12. Каковы конструкция и основные возможности УТ24?

Лабораторная работа № 11
ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ И РАЗРЕЖЕНИЯ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с принципами работы, назначением и областью применения датчиков давления и разряжения, экспериментально исследовать тарировочную характеристику датчика давления с интерфейсом «токовая петля».

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИИ ДАВЛЕНИЯ

Давление жидкостей и газов – одна из наиболее часто измеряемых величин в промышленной автоматизации. Методы и технические средства, применяемые для измерения давления, зависят от видов давления, к которым относятся:

1) *Абсолютное давление* – сумма избыточного и атмосферного давлений, то есть давление в сосуде, плюс давление окружающей среды (атмосферы). Абсолютное давление отчитывается от нуля, т.е. полного вакуума.
2) *Избыточное давление* (или *манометрическое*) – это давление в ёмкости, закрытой от атмосферы (сосуд, баллон и т. п.), без учёта давления окружающей среды (атмосферы).
3) *Дифференциальное давление* или *перепад давлений* – это значение является разностью между двумя значениями и не учитывает абсолютные давления. Соответственно датчики разности давлений имеют два входа для дальнейшего сравнения показаний давлений. Таким образом датчиками перепада давлений при помощи первичных элементов (например: сужающее устройство (диафрагма), трубка Аннубар) можно изренять расход, уровень в резервуаре и прочие параметры.

По принципу действия датчики давления делятся на:

1) *жидкостные* (основанные на уравновешивании давления столбом жидкости);
2) *поршневые* (измеряемое давление уравновешивается внешней силой, действующей на поршень);
3) *пружинные* (давление измеряется по величине деформации упругого элемента);
4) *электрические* (основанные на преобразовании давления в какую–либо электрическую величину).

По роду измеряемой величины датчики давления можно разделить на:

1) *манометры* (измерение избыточного давления);
2) *вакуумметры* (измерение давления разряжения);

3) *мановакуумметры* (измерение как избыточного давления, так и давления разряжения);
4) *напорометры* (для измерения малых избыточных давлений);
5) *тягомеры* (для измерения малых давлений разряжения);
6) *тягонапорометры*;
7) *дифманометры* (для измерения разности давлений);
8) *барометры* (для измерения барометрического давления).

Типичными являются датчики, формирующие на выходе унифицированный сигнал, позволяющий подсоединять их к другим приборам, образующих автоматическое устройство или АСУ ТП. В таком исполнении датчик давления состоит из первичного преобразователя (сенсора) и электронного блока. Принцип действия датчиков давления следующий – на сенсор подаётся давление со стороны измеряемой среды, под воздействием этого давления происходит деформация сенсора и далее генерируется электрический сигнал, который позже в электронном блоке датчика может преобразовываться в цифровой. Из стандартных выходных сигналов можно выделить сигнал 4–20 мА. Калибровка датчика заключается в том, что минимальному значению задается сигнал 4 мА, максимальному 20мА, соответственно электрический сигнал на выходе из датчика соответствует диапазону по давлению, на который рассчитан датчик. Также имеются датчики с выходными сигналами в виде изменения напряжения.

Многие современные датчики снабжены устройствами, преобразующими электрический сигнал в цифровую форму для передачи по компьютерной сети. Такие датчики имеют ряд преимуществ, таких как передача дополнительных параметров, самодиагностика, дистанционная настройка, калибровка датчика на требуемый диапазон измерений.

Датчики давления с цифровым выходным сигналом имеют большой выбор по исполнению сенсоров: емкостные, струнные, индуктивные, пьезорезистивные, магнитные, тензометрические и т.п.

2.2 Жидкостные и пружинные манометры

Жидкостные манометры (рисунок 112, *а*) широко применяются в качестве образцовых приборов для лабораторных и технических измерений. В качестве рабочей жидкости используется спирт, вода, ртуть, масла. Двухтрубный манометр представляет из себя U–образную трубку, заполненную затворной жидкостью.

Чашечный (однотрубный) манометр (рисунок 112, *б*) является разновидностью U–образного трубного манометра, у которого одна из трубок заменена сосудом большого диаметра (чашкой). Измеряется давление P_a, действующее на жидкость в широком сосуде, а открытый конец трубки совмещен с атмосферой. Чашечные и трубные манометры применяются для тарировки и поверки рабочих приборов, реже – в качестве рабочих приборов.

Пружинные манометры (рисунок 112, *в*) состоят из трубчатой пружины 1 с поводком, зубчатого сектора 3 и шестерни 4 с прикрепленной к ней стрелкой 2. При увеличении давления трубчатая пружина стремится разогнуться, в результате чего она через поводок начинает взаимодействовать на зубчатый сектор, отклоняя стрелку.

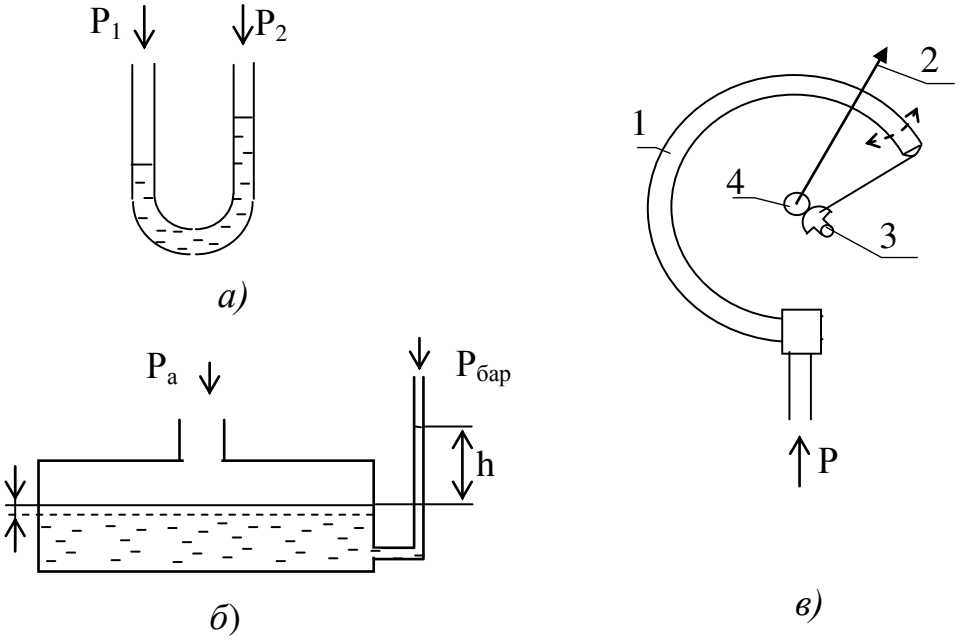


Рисунок 112 – Жидкостный (*а*), чашечный (*б*) и пружинный (*в*) манометры

2.3 Реостатные датчики давления

Реостатные (потенциометрические) датчики представляют собой реостат, величина сопротивления которого меняется при перемещении скользящего контакта (рисунок 113).

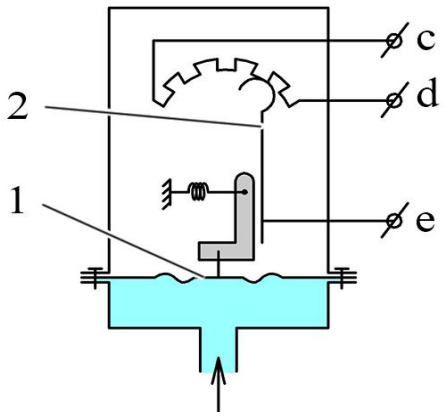


Рисунок 113 – Реостатный датчик давления

Жидкость под давлением воздействует на мембрану 1, деформация которой через рычажный механизм передается подвижному контакту 2. Перемещение подвижного контакта вызывает изменение сопротивлений ветвей *ce* и *de*, подключенных по мостовой измерительной схеме.

Проводник реостата может представлять собой тонкую проволоку с высоким удельным сопротивлением, намотанную на диэлектрический каркас, либо выполняться нанесением гальваническим способом или плазменным напылением на диэлектрическую пластину металло-графитового состава.

Конструкция датчика достаточно простая, но наличие скользящего контакта, подверженного окислению и загрязнению, снижает эксплуатационную надежность.

2.4 Емкостные датчики

Основываются на разбалансировке дифференциальной емкостной структуры, в которой средняя обкладка двух последовательно включенных конденсаторов является общей и служит диафрагмой. Расстояние между ними заполнено изолирующей средой. В большинстве таких датчиков давления производители используют силиконовое масло либо инертный заполнитель. Диафрагма, расположенная между этими пластинами прогибается под воздействием измеряемой среды. При этом при измерении избыточного давления на сторону низкого давления диафрагмы подаётся атмосферное давление. При измерении абсолютного давления подаётся эталонное давление на мембрану. Далее пластины определяют угол наклона диафрагмы и посылают сигнал на блок электроники.

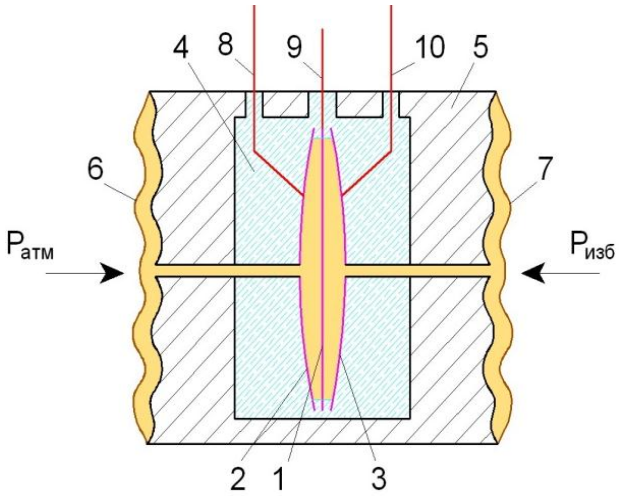


Рисунок 114 – Конструкция емкостного датчика давления

Сенсорная мембрана 1 и металлизированные обкладки 2, 3 образуют электрические конденсаторы, изолированные диэлектриком 4. Образовавшийся блок установлен в металлический корпус 5. Внутренние полости электрических конденсаторов соединены с полостями, образованными разделительными мембранами и корпусом.

Обкладки и сенсорная мембрана проводниками 8, 9 и 10 подключаются к мостовой измерительной схеме. Измеряемое давление через разделительную мембрану воздействует на сенсорную мембрану и прогибает её. Расстояние между сенсорной мембраной и обкладкой 2 уменьшается,

что вызывает увеличение электрической ёмкости конденсатора, образованного сенсорной мембраной и обкладкой 2, и уменьшение ёмкости конденсатора, состоящего из сенсорной мембраны и обкладки 3.

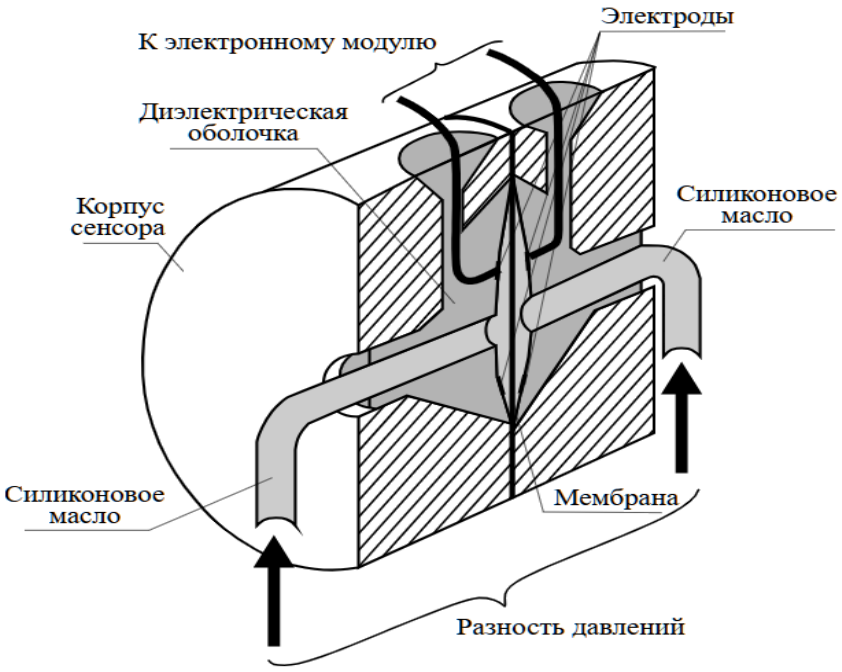


Рисунок 115 – Емкостный сенсор современных датчиков давления

Емкостный сенсор используется в некоторых современных датчиках давления. Пространство между мембраной и электродами заполнено силиконовым маслом, служащим для передачи давления на мембрану и одновременно для увеличения емкости конденсатора. При подаче разности давлений на сенсор мембрана деформируется, и емкость между обкладками изменяется. Измерение емкости производится электронным модулем датчика, подключенным к обкладкам сенсора. Кроме того, сенсор обычно содержит еще и термопреобразователь (на рисунке 115 не показан).

Преимущества емкостного принципа измерения:

сравнительно простая конструкция сенсора;

достаточно высокая чувствительность ($\Delta C/C$ = 15...20%);

большой практический опыт разработки датчиков с емкостными сенсорами, накопленный к настоящему времени.

Недостатки и ограничения емкостных сенсоров, вытекающие из базовых законов физики и до конца неустранимые за счет совершенствования конструкции, материалов и технологии изготовления:

нелинейный выходной сигнал сенсора;

значительный гистерезис (из-за неидеальных упругих свойств мембраны);

сильное влияние статического давления (за счет изменения диэлектрической проницаемости заполняющей жидкости);

существенное влияние температуры (за счет температурного расширения элементов сенсора и изменения диэлектрической проницаемости);

недостаточная стабильность (из-за "усталости" материала мембраны);

чувствительность к вибрации (резонансная частота колебаний мембраны находится в пределах спектра промышленных вибраций).

Часть этих недостатков (нелинейность, влияние температуры и отчасти давления) до определенной степени компенсируется в современных серийных датчиках путем так называемой "характеризации", т. е. калибровки датчиков на заводе-изготовителе при различных температурах и давлениях с дальнейшим расчетом и "прошивкой" таблицы поправочных коэффициентов в память микропроцессорного электронного модуля. Это весьма трудоемкая и дорогостоящая процедура, требующая специального высокоточного оборудования, что сказывается на стоимости датчиков.

Другие недостатки (гистерезис, дрейф нуля, остаточное влияние статического давления, чувствительность к вибрации) не могут быть скомпенсированы характеризацией. Чтобы уменьшить эти недостатки, изготовители применяют современные прогрессивные материалы для центральной мембраны сенсора, а также различные, все более изощренные варианты конструкции сенсора. Определенный прогресс в данном вопросе имеется, однако, кардинальные решения, устраняющие указанные недостатки, невозможны в принципе, поскольку эти недостатки заложены в самом емкостном принципе измерения. А каждое следующее небольшое улучшение характеристик значительно усложняет конструкцию и технологию изготовления датчика, что ведет к его удорожанию и не способствует повышению надежности.

2.5 Тензо- и пьезорезистивные датчики

Тензо- или пьезорезистивный принцип измерения давления основан на изменении удельного сопротивления вещества при деформации (тензорезистивный эффект).

Термин *«тензорезистивный»* употребляется, как правило, по отношению к датчикам, в которых используются тонкопленочные тензопреобразователи, либо структуры КНС (кремний на сапфире). Типичный тензорезистивный датчик давления на основе структуры КНС (рисунок 116) состоит из упругой металлической мембраны, к которой припаян тензопреобразователь, представляющий собой подложку из сапфира, на которой методом гетероэпитаксиального наращивания сформирован измерительный мост Уитстона из кремниевых тензорезисторов. Кроме тензомоста, на подложке сформирована схема температурной компенсации (на рисунке 116 не показана). Мембрана по технологическим соображениям делается

достаточно толстой, поскольку поверхность, на которую припаивается КНС, должна быть отполирована с высокой чистотой.

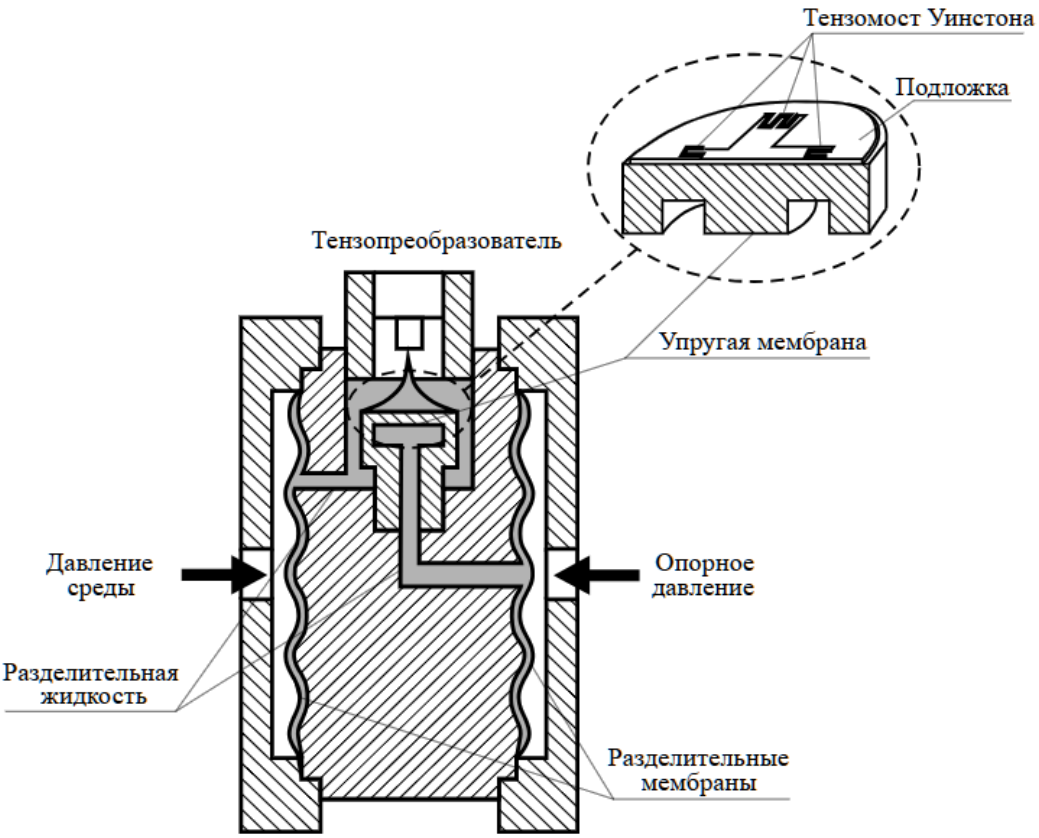


Рисунок 116 – Тензорезистивный датчик давления

Измеряемое давление подводится через штуцер в рабочую полость датчика и вызывает деформацию диафрагмы. Это приводит к изменению геометрии резисторов, находящихся с ней в тесной механической связи и изменению их сопротивления. Происходит преобразование приложенного давления (механический вход) в изменение сопротивления (электрический выход).

Достоинства тензорезистивного принципа измерения давления:

сравнительная простота в изготовлении;

невысокая стоимость;

потенциально широкий диапазон рабочих температур.

Недостатки тензорезистивных сенсоров:

низкая чувствительность (в пределах 1%);

значительные гистерезисные явления и нестабильность (из-за неоднородности конструкции и "усталости" металла мембраны);

сильное влияние температуры (за счет различия коэффициентов температурного расширения элементов сенсора и изменения электропроводности кремния);

сильное влияние статического давления (из-за различия упругих свойств элементов конструкции);

наличие нелинейности.

Пьезорезистивны датчики основаны на использовании материалов, которые изменяют сопротивление протеканию тока при сжатии или растяжении. Металл в некоторой степени пьезорезистивен, но в большинстве датчиков давления используется полупроводниковый кремний. *«Пьезорезистивными»* обычно называют монокристаллические кремниевые сенсоры с диффузионными пьезорезисторами, в которых упругим элементом служит сама кремниевая мембрана.

В некоторых пьезорезистивных датчиках давление передаётся через заполняющую жидкость от диафрагмы к пьезорезистору 1, сопротивление которого меняется при изменении давления на него (рисунок 117). Часто пьезорезистивные сенсоры давления содержат четыре пьезорезистора, размещенных над вытравленной тонкой кремниевой диафрагмой и соединенных в мост. Изменения давления вызывают изгиб диафрагмы, при этом изменяется сопротивление резисторов пропорционально воздействию, что дает разбалансировку моста и возможность получить выходной электрический сигнал.

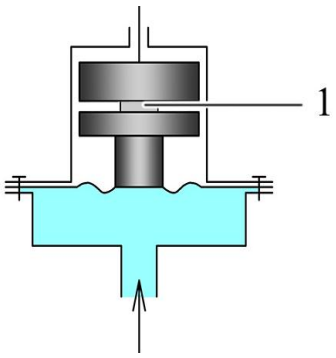


Рисунок 117 – Пьезорезистивный датчик давления

Достоинства пьезорезистивных сенсоров:

малый гистерезис;

стойкость к вибрации;

однородность упругой мембраны.

Недостатки:

низкая чувствительность (2...5%);

сильное влияние температуры (за счет изменения удельного сопротивления пьезорезисторов);

существенное влияние статического давления;

недостаточная стабильность (фактором дрейфа является загрязненность примесями);

наличие нелинейности.

2.6 Индуктивные датчики давления

Индуктивные датчики основаны на передаче магнитных полей от тела к другому телу, не контактирующим с первым. Иными словами – конструктивно индуктивный датчик имеет железный сердечники и обмотку, по которой проходит ток. Сердечник соединен с диафрагмой и при изменении давления меняется положение сердечника относительно самой обмотки, соответственно меняется индуктивность обмотки. Далее сигнал преобразовывается в электронном блоке.

В индуктивных датчиках используются те же принципы, что и в индуктивных датчиках перемещений (рассмотрены в лабораторной работе «Индуктивные, трансформаторные, индукционные и емкостные датчики»).

2.7 Резонансные датчики давления

Резонансный принцип измерения давления основан на преобразовании деформации резонатора в частоту колебаний. Конструкция и схема подключения резонансного сенсора представлены на рисунке 118.

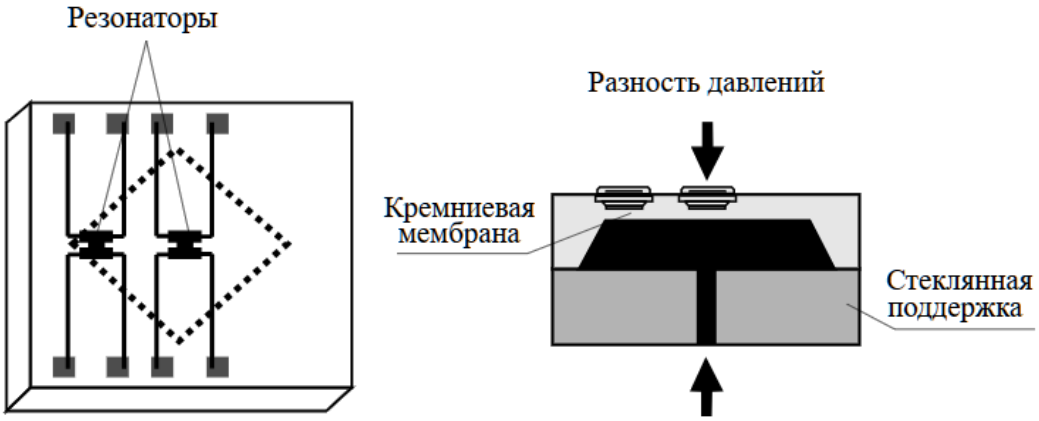


Рисунок 118 – Конструкция резонансного датчика давления

Датчик представляет собой монокристаллическую кремниевую мембрану специальной конструкции, на которой методом эпитаксиального наращивания сформированы два резонатора Н-образной формы. Мембрана закреплена на стеклянной подложке, разность давлений от внешних разделительных мембран датчика передается на сенсор через силиконовое масло. Резонаторы находятся в поле постоянного магнита, и каждый из них подключен в качестве частотно-задающего элемента в цепь обратной связи генератора переменного напряжения. За счет пьезоэлектрического эффекта, которым обладает кремний, напряжение на одной паре контактов резонатора преобразуется в его деформацию, а затем обратно в напряжение на другой паре контактов. В результате в цепи генерируется синусоидальное переменное напряжение на собственной частоте резонатора. Кварцевые резонаторы более простой конструкции повсеместно используются в электронных схемах в качестве высокостабильных частотозадающих элементов.

При приложении к датчику разности давлений мембрана изгибается, в результате ее деформации собственные частоты резонаторов изменяются пропорционально приложенному давлению. Датчик спроектирован таким образом, что один резонатор при этом растягивается, а другой сжимается. Соответственно частота первого резонатора уменьшается, а второго увеличивается. Разность этих частот, прямо пропорциональная разности давлений, измеряется электронным модулем датчика и по ней вычисляется разность давлений.

Дифференциально-резонансный принцип измерения и конструкция кремниевого резонансного сенсора обладают целым рядом очень важных преимуществ:

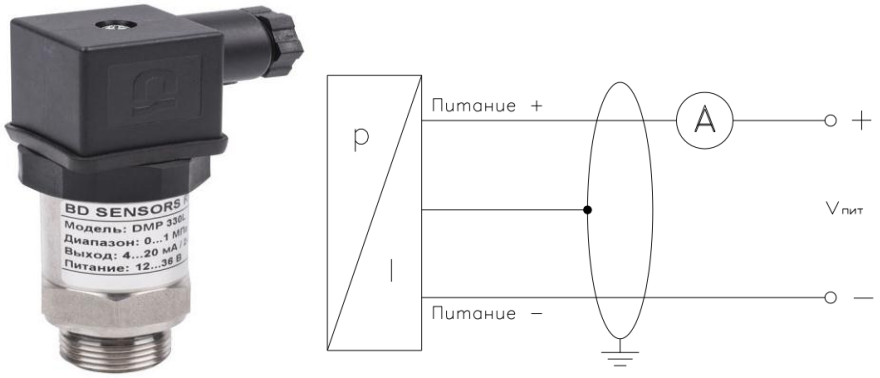
1) Резонансный сенсор благодаря абсолютным упругим свойствам монокристаллического кремния не имеет гистерезиса (<0,001% измеряемой величины, в пределах погрешности эталонных средств измерения) и практически лишен нелинейности (<0,003% измеряемой величины).
2) Собственные частоты резонаторов (порядка 90 кГц) лежат далеко за пределами спектра промышленных шумов, что обеспечивает сенсору нечувствительность к наводкам.
3) Датчик имеет дифференциальный выходной сигнал сенсора в сочетании с очень низким коэффициентом температурного расширения. *Дифференциальный сигнал* — способ электрической передачи информации с помощью двух противофазных сигналов. В данном методе один электрический сигнал передаётся в виде дифференциальной пары сигналов, каждый по своему проводнику, но представляет инвертированный сигнал другого, противоположный по знаку. Приёмник дифференциального сигнала реагирует на разницу между двумя сигналами, а не на напряжение в проводнике относительно потенциала общего провода, что обеспечивает высокую помехозащищенность измерительной цепи.
4) У резонансного сенсора отсутствуют факторы дрейфа, поскольку монокристаллический кремний химически инертен и не подвержен "усталости", что обеспечивает практически абсолютную стабильность при длительном сроке эксплуатации.
5) Частотный выходной сигнал датчика не требует аналого-цифрового преобразования (АЦП). Резонансные частоты измеряются непосредственно цифровыми счетчиками с очень высокой точностью (<0,004% в серийных датчиках). Это позволяет сделать датчик в полном смысле слова *цифровым***,** устранить такие традиционные проблемы, как временную и температурную нестабильность аналоговых цепей измерительного усилителя и АЦП, необходимость подстройки нуля и калибровки датчика после перенастройки шкалы (у цифрового датчика перенастройка сводится к изменению коэффициентов, используемых микропроцессором для пересчета результатов измерения в аналоговый выходной сигнал). При передаче результа-

тов измерений по цифровым протоколам перенастройка шкалы такому датчику вообще не требуется.

Разработка резонансного принципа измерения стала прорывом в процессе совершенствования датчиков разности давлений. Она позволила добиться недостижимых прежде технических и метрологических характеристик датчиков, причем не путем усложнения их конструкции и технологии изготовления (различные компенсационные схемы, характеризация и т. д.), а за счет самого принципа измерений и конструкции датчика.

2.8 Принцип действия и устройство канала измерения давления стандарта «токовая петля»

Измерение давления в данной лабораторной работе производится при помощи датчика DMP 330L, рассчитанного на максимальное давление 0,6 Мпа (6 бар) с токовым выходом стандарта «токовая петля» (рисунок 119).



а) *б)*

Рисунок 119 – Внешний вид (*а*) и схема подключения (*б*) датчика DMP 330L

Аналоговый интерфейс «токовая петля» используется для передачи информации с 1950-х годов, а в 1980-х годах начала широко применяться «токовая петля» 4...20 мА в разнообразном технологическом оборудовании, датчиках и исполнительных устройствах средств автоматики. Популярность «токовой петли» начала падать после появления цифрового стандарта на интерфейс RS-485 (1983 г.), однако в настоящее время аналоговый стандарт все еще широко распространён.

Преимуществом «токовой петли» является то, что ток, вытекающий из источника тока, не зависит от параметров нагрузки. Поэтому в «токовой петле» протекает ток, не зависящий от сопротивления кабеля $R_{каб}$, сопротивления нагрузки $R_н$ и э. д. с. индуктивной помехи $E_{инд}$ (рисунок 120), а также от напряжения питания источника тока $E_п$. Строго говоря, ток в петле может измениться только вследствие утечек в кабеле связи, которые очень малы. Это свойство токовой петли является основным преимуществом и определяет все варианты ее применения. Емкостная наводка помехи $E_{емк}$, э. д. с. которой приложена не последовательно с источником тока, а параллельно ему, не

может быть ослаблена в "токовой петле" и для ее подавления следует использовать экранирование сигнальных проводов.

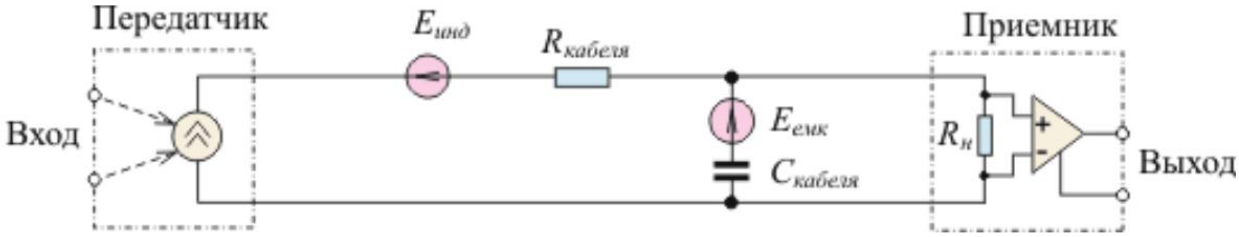


Рисунок 120 - Принцип действия "токовой петли"

В качестве линии передачи обычно используется экранированная витая пара, которая совместно с дифференциальным приемником позволяет ослабить индуктивную и синфазную помеху.

На приемном конце ток петли преобразуется в напряжение с помощью калиброванного сопротивления $R_н$. При токе 20 мА для получения стандартного напряжения 2,5 В, 5 В или 10 В используют резистор сопротивлением 125 Ом, 250 Ом или 500 Ом соответственно.

Основным недостатком "токовой петли" является ее принципиально низкое быстродействие, которое ограничивается скоростью заряда емкости кабеля $C_{кабеля}$ от источника тока. Например, при типовой погонной емкости кабеля 75 пФ/м и длине 1 км емкость кабеля составит 75 нФ. Для заряда такой емкости от источника тока 20 мА до напряжения 5 В необходимо время 19 мкс, что ограничивает скорость передачи в цифровом формате до около 9 кбит/с.

Вторым недостатком "токовой петли", ограничивающим ее практическое применение, является отсутствие стандарта на конструктивное исполнение разъемов и электрические параметры, хотя фактически стали общепринятыми диапазоны токовых сигналов 0...20 мА и 4...20 мА; гораздо реже используют 0...60 мА. В современных и перспективных разработках рекомендуется использовать только диапазон 4...20 мА, как обеспечивающий возможность диагностики обрыва линии. Интерфейс «токовая петля» распространен в двух версиях: цифровой и аналоговой.

Аналоговая версия "токовой петли" используется, как правило, для передачи сигналов от разнообразных датчиков к контроллеру или от контроллера к исполнительным устройствам. Применение "токовой петли" в данном случае дает два преимущества. Во-первых, приведение диапазона изменения измеряемой величины к стандартному диапазону обеспечивает взаимозаменяемость компонентов. Во-вторых, становится возможным передать сигнал на большое расстояние с высокой точностью (погрешность "токовой петли" может быть снижена до ±0,05%). Кроме того, стандарт "токовая петля" поддерживается подавляющим большинством производителей средств промышленной автоматизации.

В варианте "4...20 мА" в качестве начала отсчета принят ток 4 мА. Это позволяет производить диагностику целостности кабеля (кабель имеет раз-

рыв, если ток равен нулю) в отличие от варианта "0...20 мА", где величина "0 мА" может означать не только нулевую величину сигнала, но и обрыв кабеля. Вторым преимуществом уровня отсчета 4 мА является возможность подачи энергии датчику для его питания.

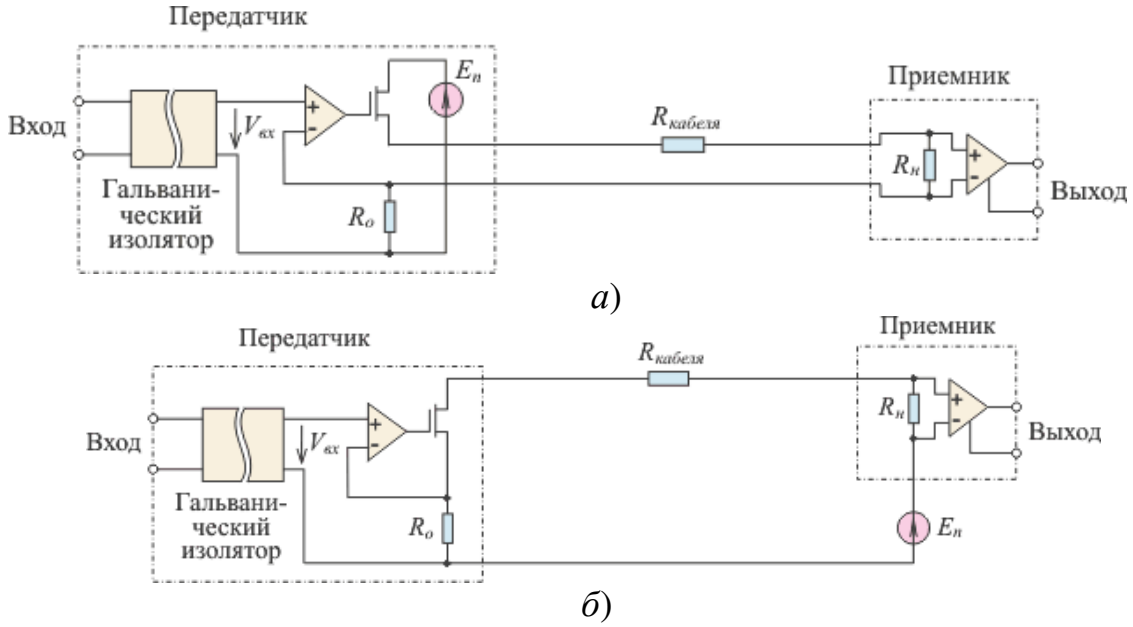


Рисунок 121 – Аналоговая «токовая петля» со встроенным в передатчик источником питания (*а*) и выносным (*б*)

На рисунке 121 показаны два варианта построения аналоговой «токовой петли». В варианте (*а*) используется встроенный незаземленный источник питания $E_п$, в варианте (*б*) источник питания - внешний. Встроенный источник удобен при монтаже системы, а внешний удобен тем, что его можно выбрать с любыми параметрами в зависимости от поставленной задачи.

Принцип действия обоих вариантов состоит в том, что при бесконечно большом коэффициенте усиления операционного усилителя (ОУ) напряжение между его входами равно нулю и поэтому ток через резистор R_0 равен $V_{вх}/ R_0$, а поскольку у идеального ОУ ток входов равен нулю, то ток через резистор строго равен току в петле $I= V_{вх}/ R_0$ и, как следует из этой формулы, не зависит от сопротивления нагрузки. Поэтому напряжение на выходе приемника определяется как

Достоинством схемы с операционным усилителем является возможность калибровки передатчика без подключенного к нему кабеля и приемника, поскольку вносимая ими погрешность пренебрежимо мала.

Цифровая токовая петля работает, как правило, в режиме 0...20 мА, поскольку цифровой сигнал проще воспроизвести именно в таком виде. Точность логических уровней здесь не так важна, поэтому источник тока петли может обладать не очень большим внутренним сопротивлением и сравнительно низкой точностью.

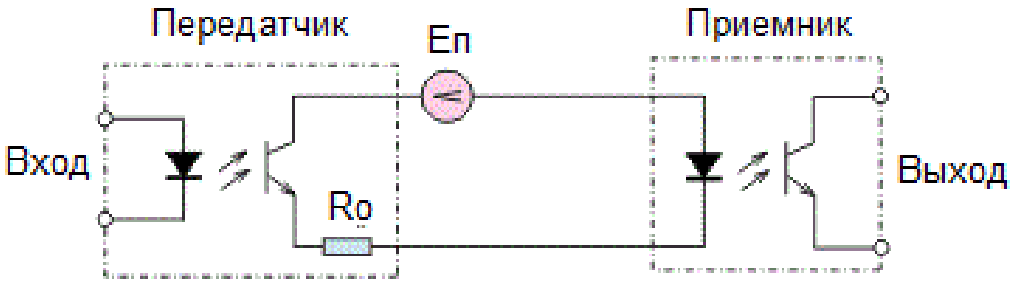


Рисунок 122 - Принцип реализации цифровой "токовой петли"

На приведенной схеме (рисунок 122) при напряжении питания 24 В на входе приемника падает 0,8 В (на светодиоде), значит при сопротивлении резистора 1,2 кОм ток будет равен 20 мА. Падением напряжения на кабеле, даже при его сопротивлении в 10% от общего сопротивления петли, можно пренебречь, как и падением напряжения на оптроне (на цепи коллектор-эмиттер оптотранзистора). Практически в данных условиях можно считать передатчик источником тока.

Как аналоговая, так и цифровая "токовая петля" может использоваться для передачи информации нескольким приемникам одновременно при их последовательном соединении.

2.9 Устройство и принцип действия лабораторного стенда

Лабораторный стенд (рисунок 123) состоит из металлического основания, шкафа управления, электронасоса, бака для воды, датчика давления, манометра, вентиля для задания режимов работы, пневмогидравлического аккумулятора.

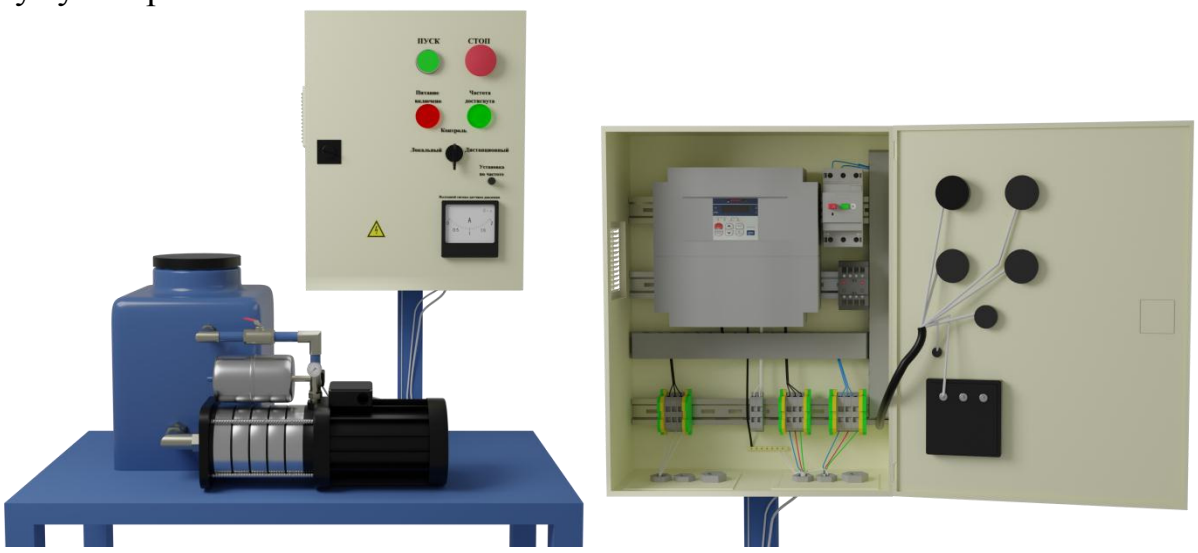


Рисунок 123 – 3D модель стенда

Основание стенда выполнено методом сварки из металлопрофиля и листовой стали. Используется около 50 литров воды, которая находится в пластиковом баке и перекачивается насосом с асинхронным электроприводом в

режиме циркуляции. При помощи вентиля обеспечивается изменение расхода и давления воды вплоть до полной остановки перекачки.

Гидроаккумулятор представляет собой расширительный мембранный бак, который также служит для поддержания давления в напорной системе водоснабжения, предотвращения гидроударов и уменьшения числа включений и выключений насоса. Применение гидроаккумулятора позволяет упростить настройку частотного преобразователя в режиме регулирования по давлению воды. Механический манометр служит для контроля давления воды в подающем трубопроводе и может использоваться в лабораторной работе по изучению принципа действия датчиков давления с выходным сигналом «токовая петля» для снятия тарировочной характеристики.

В шкафе управления используется преобразователь частоты ВЕСПЕР EI-8001, автомат защиты двигателя MKS1TM - 16 (защита от перегрузки в переделах 10-16 А, короткого замыкания, обрыва фазы), коммутационная и сигнальная аппаратура (рисунок 124).

В процессе работы стенда величина давления в подающем трубопроводе измеряется при помощи датчика избыточного давления DMP 330L, преобразующего величину давления в электрический аналоговый сигнал. Если давление падает ниже минимума, то станция управления плавно запускает электронасос для предотвращения гидроудара, затем величина давления поддерживается при помощи изменения частоты вращения.

3 ПРОГРАММА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить принципы работы, назначение, область применения датчиков давления и разрежения.
2. Изучить принцип действия и особенности интерфейса «токовая петля»
3. Собрать схему, представленную на рисунке 125. Между клеммами 1 и 2 в блоке сопряжения находится шунтирующий резистор величиной 500 Ом (точнее, два параллельно включенных резистора по 1 Ком), при этом при токе в измерительной цепи датчика величиной 20 мА падение напряжения на шунте будет составлять около 10 В (из-за погрешности резисторов напряжение может незначительно отличаться).
4. Переключатель «Контроль» перевести в положение «Дистанционный».
5. Открыть шаровой кран на подающем трубопроводе, включить питание щита управления (это делает преподаватель). Амперметр на щите управления должен показывать значение 4 мА.
6. Нажать кнопку «Пуск» на щите управления, изменяя величину расхода воды при помощи шарового крана и уставку преобразователя частоты при помощи потенциометра на щите управления снять экспериментальные зависимости P=f(I) и P=f(U). Величину давления определять по пружинному манометру.

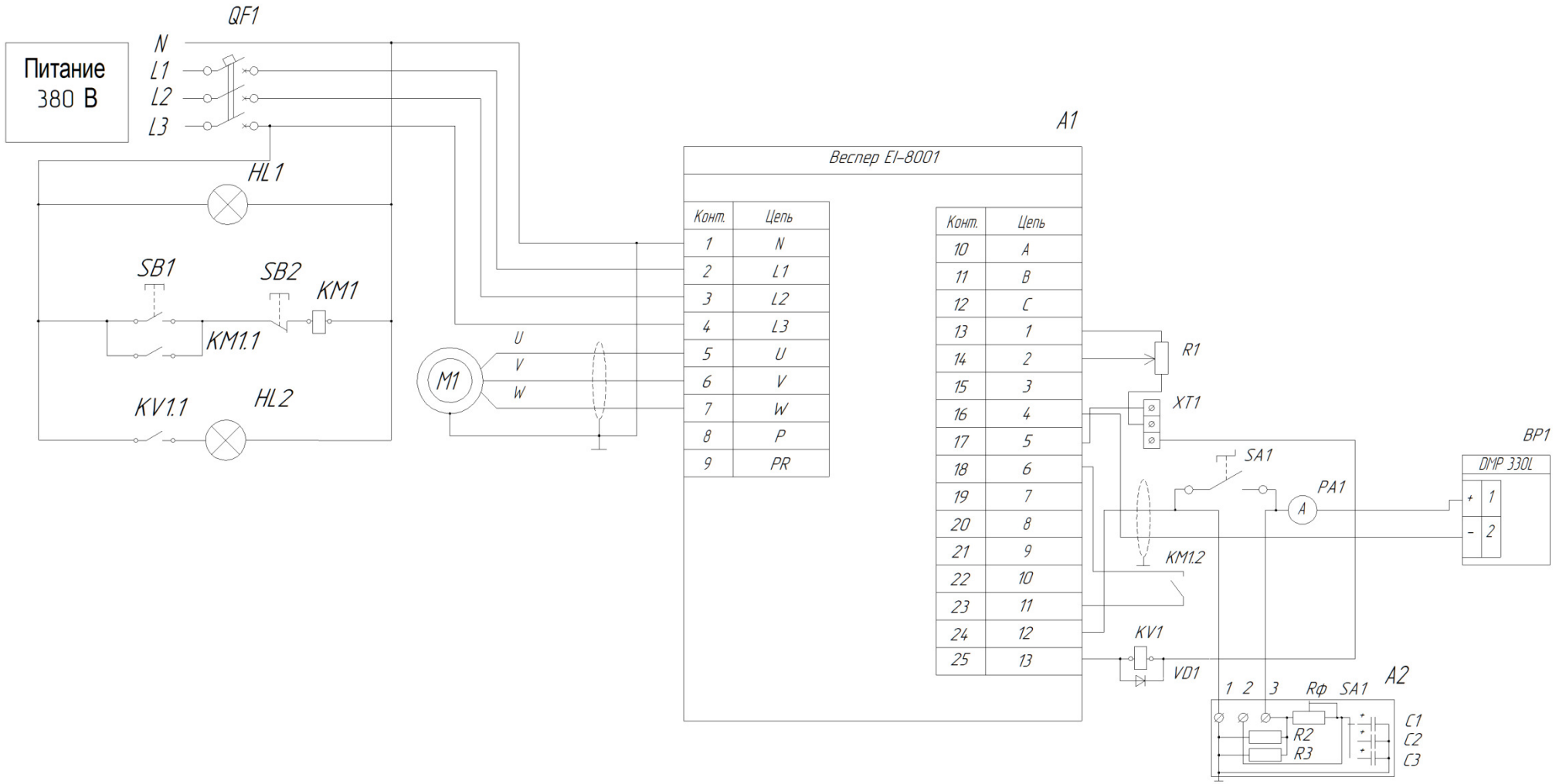


Рисунок 124 – Принципиальная схема лабораторного стенда

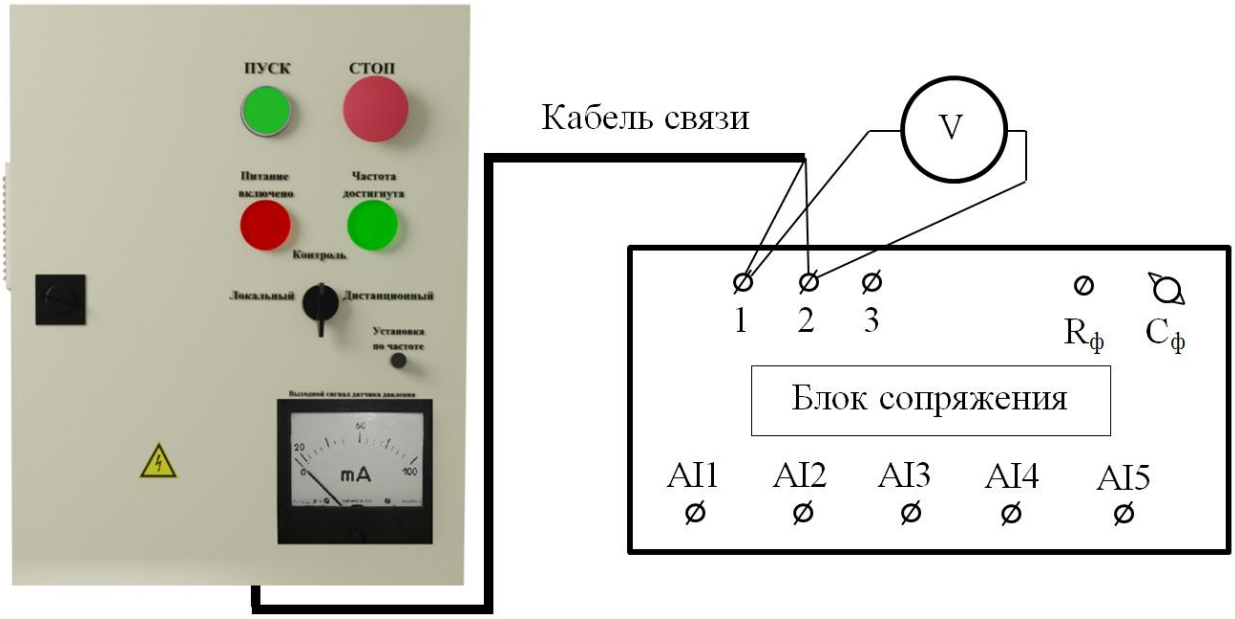
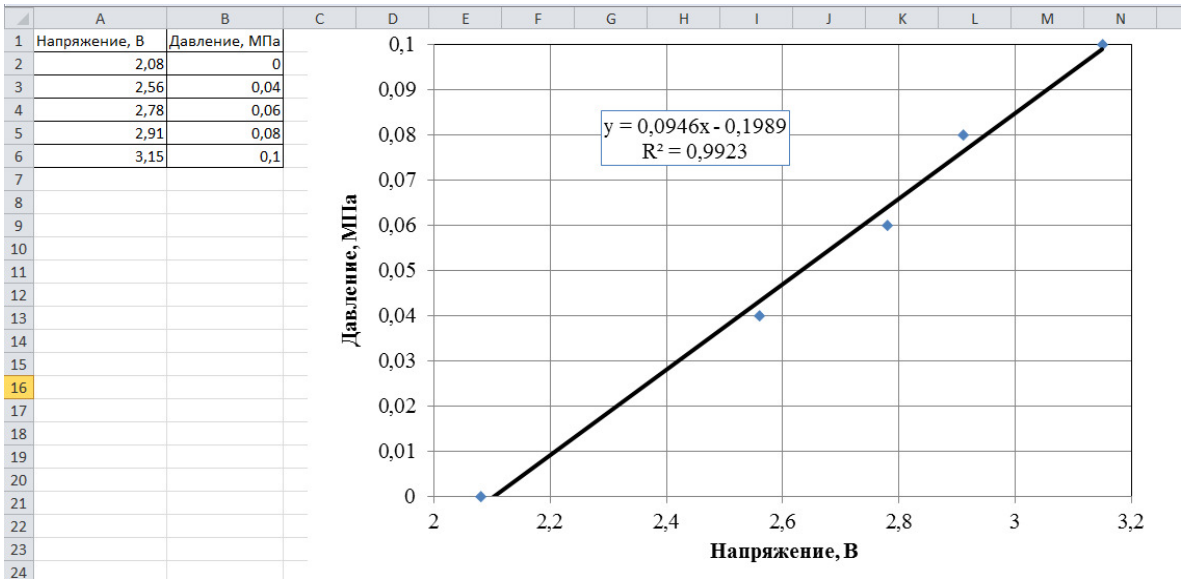


Рисунок 125 – Схема для тарировки датчика давления

7. В электронных таблицах построить точечные графики P=f(I) и P=f(U), добавить на них аппроксимирующий график (линию тренда типа «Линейная»). При построении линии тренда указать опцию вывода на экран уравнения регрессии и величину достоверности аппроксимации R^2. Если величина R^2 имеет значение, близкое к 1, значит уравнение регрессии определено достаточно точно.
8. Оформить графики в соответствии с примером, показанном на рисунке 126.



	A	B
1	Напряжение, В	Давление, МПа
2	2,08	0
3	2,56	0,04
4	2,78	0,06
5	2,91	0,08
6	3,15	0,1

Рисунок 126 – Пример оформления графиков

9. Сохранить документ, подготовленный в электронных таблицах для дальнейшего использования. Оформить отчет.

4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

В отчете необходимо привести схему интерфейса «токовая петля» (рисунок 120), таблицы экспериментальных данных, тарировочные графики и уравнения регрессии, выводы по работе.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Виды измеряемых давлений.
3. Классификация датчиков давления и разрежения по принципу действия
4. Классификация датчиков давления и разрежения по роду измеряемой величины.
5. Принцип действия жидкостных и пружинных манометров.
6. Принцип действия реостатных датчиков давления и разрежения.
7. Принцип действия емкостных датчиков давления и разрежения.
8. Принцип действия тензо- и пьезорезистивных датчиков давления и разрежения.
9. Принцип действия индуктивных датчиков давления и разрежения.
10. Принцип действия резонансных датчиков давления и разрежения.
11. Принцип действия и устройство канала измерения давления стандарта «токовая петля.

Лабораторная работа № 12
НАСТРОЙКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ (ПЧ) АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСА ВОДОСНАБЖЕНИЯ В АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с устройством, принципом действия и настройки преобразователей частоты для асинхронного электропривода в автоматической системе регулирования на примере АСР давления в системе водоснабжения и ПЧ ВЕСПЕР EI-8001.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Функции шкафов управления насосами в системе водоснабжения

Главной функцией шкафа управления насосами водоснабжения является возможность автоматического управления для обеспечения нужного давления и непрерывности подачи воды потребителям. Шкаф (щит, ящик) управления может одновременно контролировать работу сразу нескольких электронасосных агрегатов (групп насосов, резервных насосов).

Шкафы управления, в зависимости от их конструкции, могут выполнять следующие функции:

регулирование давления (напора) в системе подающих трубопроводов;

плавный запуск электродвигателей насосов, благодаря чему увеличивается их срок эксплуатации и осуществляется экономия электроэнергии;

дистанционное управление насосами, находящимися на большом расстоянии от шкафа;

включение резервных насосных станций при возникновении аварийной ситуации или неисправности основной системы;

контроль напряжения в сети, при этом при резких скачках происходит отключение насоса для предотвращения выхода его из строя;

защита электродвигателя и оборудования от возникновения коротких замыканий, а также от перегрузки по току.

контроль уровня воды в источнике с целью недопущения «сухого хода» насоса.

Для регулирования давления в подающих трубопроводах системы водоснабжения применяется как двухпозиционный закон (при использовании водонапорных башен или реле давления), так и непрерывный (пропорционально-интегрально-дифференциальный, ПИД) закон регулирования.

ПИД-закон регулирования давления в подающем трубопроводе позволяет обеспечить лучшие качественные характеристики, чем двухпозицион-

ный, увеличить срок службы электронасосных агрегатов и скважин водоснабжения за счет плавного и более редкого пуска, а также экономию электроэнергии. Для реализации такого закона применяют преобразователи частоты (ПЧ), принцип действия которых основан на зависимости скорости вращения и момента силы на валу асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором от частоты напряжения питания. Частотные преобразователи изменяют частоту поданного на электродвигатель напряжения, тем самым изменяя скорость вращения ротора и момент силы.

Большинство современных частотных преобразователей построено на базе схем двойного преобразования. Такое техническое решение имеет следующие преимущества:

Возможность изменять частоту как в большую, так и меньшую сторону. Выходное напряжение чистой синусоидальной формы.

Отсутствие высших гармоник.

Плавное, высокоточное регулирование частоты питающего напряжения двигателя.

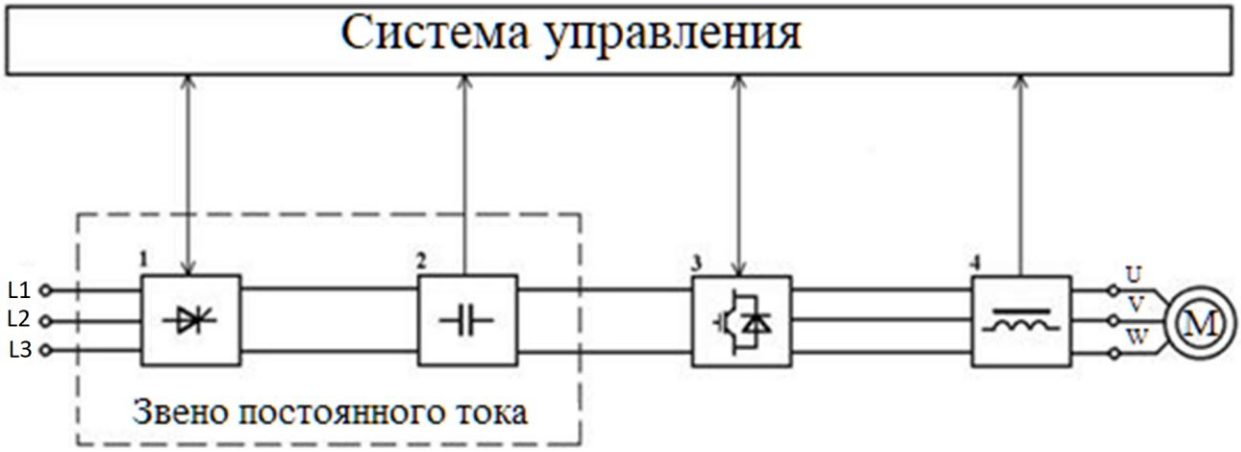


Рисунок 127 – Структурная схема преобразователя частоты

ПЧ состоит из трех основных подсистем (рисунок 127):

Звено постоянного тока, состоящее из диодного или тиристорного выпрямителя 1 с емкостным, индуктивным или комбинированным фильтром 2. Этот узел осуществляет выпрямление сетевого напряжения и его сглаживание.

Инвертора на блоках 3, 4. Эта подсистема осуществляет обратное преобразование постоянного напряжения в переменное. Индуктивный элемент 4 на выходе осуществляет фильтрацию постоянной составляющей, а также высокочастотных помех, наличие которых негативно сказывается на работе асинхронного электродвигателя М.

Системы управления на базе микропроцессора. Основная ее функция – задание частоты выходного напряжения и тока. Частота тока на выходе инвертора определяется шириной или длительностью управляющих импульсов (широтно- или частотно- импульсная модуляция). Процессор также осуществляет связь с удаленными пунк-

тами управления, автоматическое регулирование при помощи обратной связи по механическим и электрическим характеристикам подключенного к ПЧ электропривода, а также другие функции.

Таким образом, при частотном регулировании питающее напряжение сначала преобразуется в постоянное, затем инвертируется в переменное напряжение требуемой частоты.

2.2 Общая методика настройки преобразователя частоты

Преобразователь частоты ВЕСПЕР EI-8001 предназначен для управления асинхронными электроприводами с электродвигателями мощностью от 0,75 до 11 кВт. Устройство обеспечивает полную защиту двигателя от аварийных режимов работы, векторное управление без обратной связи и имеет встроенный ПИ-регулятор.

Типовая схема подключения прибора показана на рисунке 128. Для монтажа в шкафы управления предусмотрена возможность подключения внешнего потенциометра и кнопок управления электроприводом,

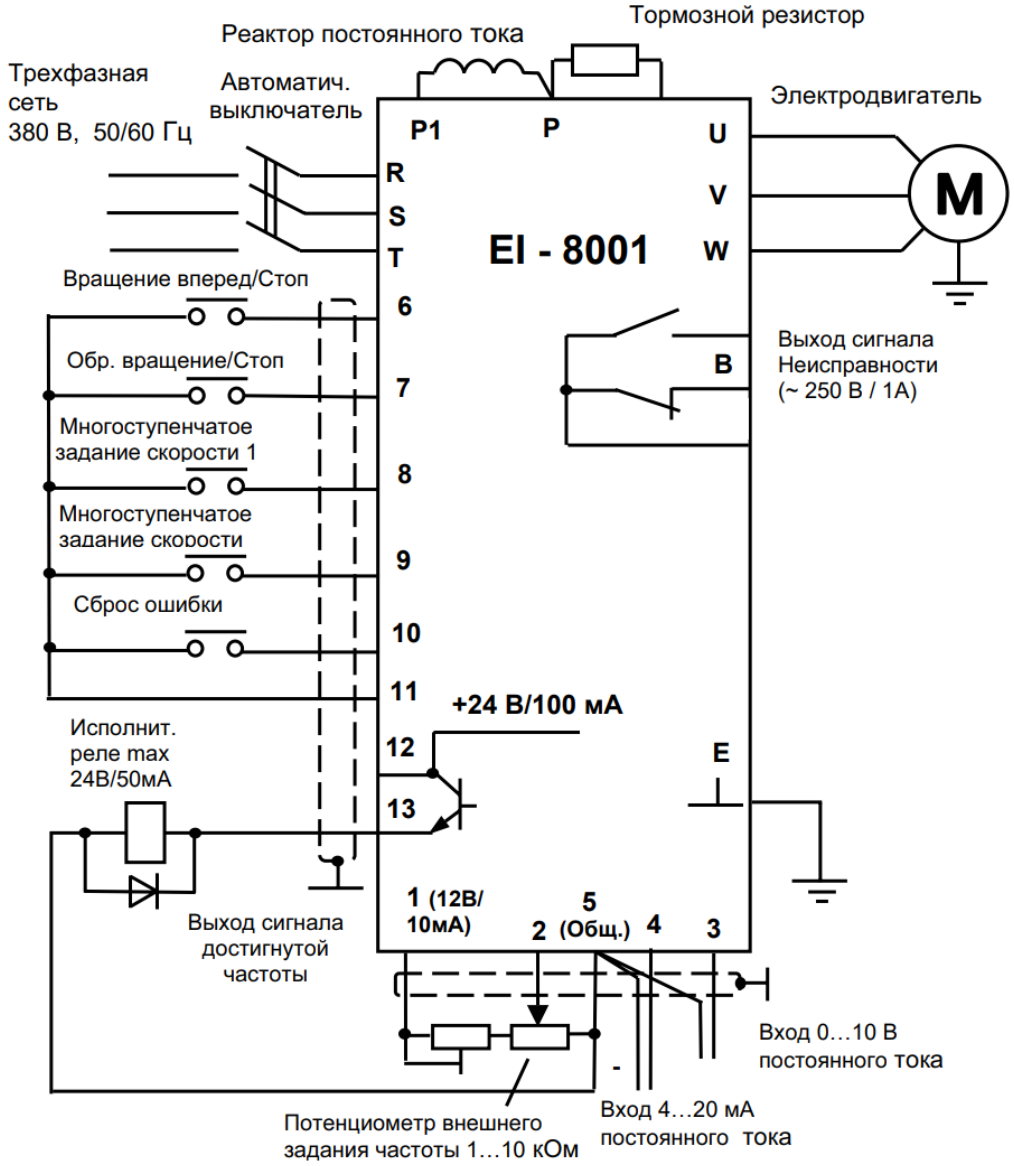


Рисунок 128 – Типовая схема подключения ПЧ ВЕСПЕР EI-8001

Преобразователь частоты ВЕСПЕР EI-8001 является микропроцессорным устройством, поэтому предполагается настройка его режимов работы при помощи переключателей и ввода параметров с пульта управления. При этом осуществляется не только конфигурация прибора (например, задание частоты при помощи встроенного или отдельного потенциометра, пуск и остановка кнопками на панели управления ПЧ или отдельными кнопками на щите и т.п.), но и задание большого количества параметров, которые разделяются на основные (характеристики электродвигателя, уставки по частоте, время пуска/остановки, коэффициенты настройки ПИ-регулятора) и высокоуровневые (выбор вида соотношения напряжение/частота для правильного управления по типу механической характеристики рабочей машины электропривода, более «тонкие» настройки на конкретный электропривод, функции логических входов для дистанционного управления и т.п.).

На индикаторе встроенного пульта управления (рисунок 129) может быть индицирована следующая информация: выходная частота преобразователя, уставка параметра или устанавливаемая величина уставки, рабочее и аварийное состояния.

Для просмотра и изменения параметра используются кнопки управления:

– выбор параметра: ▼ следующий параметр или уменьшение величины параметра, и ▲ предыдущий параметр или увеличение величины параметра (нажатие этих кнопок не дает запоминания выбранного значения параметра);

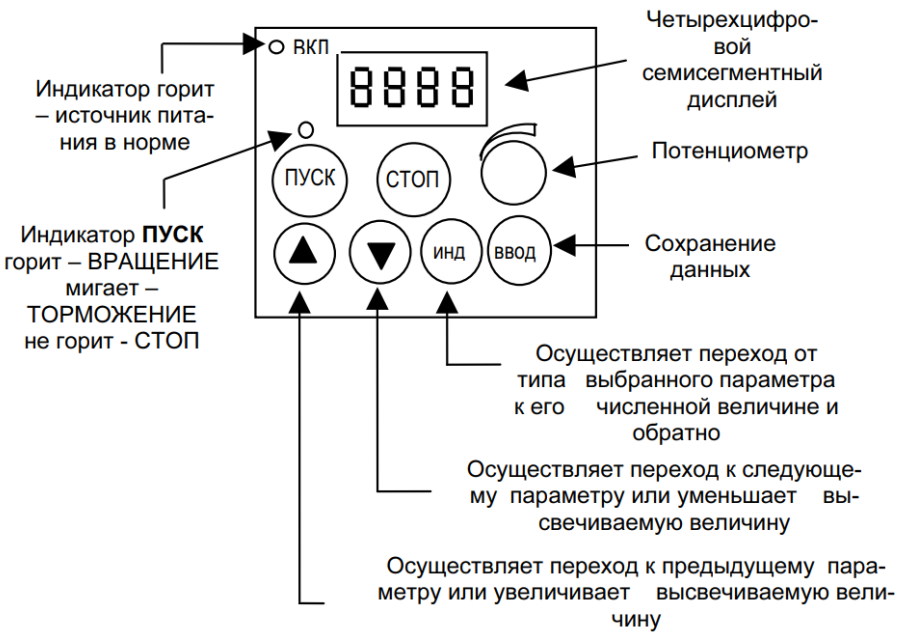


Рисунок 129 - Функции элементов встроенного пульта управления ПЧ ВЕСПЕР EI-8001

– (инд) вывод на индикатор величины параметра, его состояния или назначение (при помощи этой кнопки можно прочитать значение или вернуться к списку параметров);
– (ввод) запоминание, сохранение выбранной величины (во время запоминания дисплей мигает).

Параметры ПЧ делятся на три типа:
– параметры индикации (показывают значения данных);
– параметры настройки (могут быть изменены как при работе электропривода, так и при его останове);
– параметры программы (могут быть изменены при останове и высвечиваются в режиме управления преобразователем).

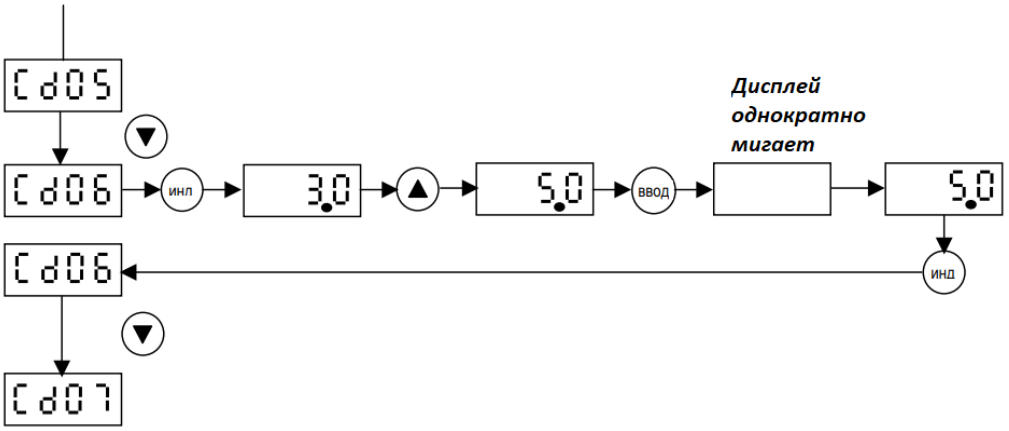


Рисунок 130 – Пример программирования времени разгона с 3 до 5 с.

Рассмотрим пример изменения времени плавного пуска ПЧ с ранее установленной величины 3 с на величину 5 с (рисунок 130). Параметр, отвечающий за время разгона электродвигателя, обозначается d06. Для изменения этого параметра в режиме индикации частоты или готовности hndY нужно нажатиями кнопок (▼) или (▲) добиться отображения на дисплее параметра d06, затем нажать кнопку (инд). Когда на дисплее отобразится текущее значение величины параметра, при помощи кнопок (▼) или (▲) нужно установить новое значение и нажать кнопку (ввод), при этом ПЧ запомнит новое значение параметра. Для того, чтобы вернуться к списку параметров, нужно нажать кнопку (инд).

3 ПРОГРАММА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. По материалам пособия изучить принцип действия, схему подключения и методику настройки преобразователя частоты ВЕСПЕР EI-8001.
2. Включить питание лабораторного стенда
3. Установить значения параметров настройки ПЧ в соответсвии с таблицей

7 (*остальные параметры не изменять!*).

Таблица 7 – Параметры первоначальной нстройки ПЧ

Код параметра	Функция	Значение параметра
Cd05	Частота напряжения питания, Гц	50
Cd06	Время разгона, с	По заданию преподавателя в пределах 3-10
Cd07	Время торможения, с	По заданию преподавателя в пределах 3-10
Cd08	Минимальная частота, Гц	По заданию преподавателя в пределах 10-35
Cd09	Максимальная частота, Гц	По заданию преподавателя в пределах 40-50
Cd37	Активация режима ПИ-регулирования при подключении датчика обратной связи к входам 3,4	SA1 (ПИ-регулирование отключено)

4. Закрыть дверцу шкафа управления, нажать кнопку *ПУСК*. Убедиться, что произошел плавный запуск электропривода в соответствии с установленным параметром ***Cd06*** временем разгона.
5. При помощи потенциометра «*Уставка по частоте*» убедится, что изменение частоты вращения электропривода происходит в переделах, установленных параметрами ***Cd08 и Cd09.***
6. Нажать кнопку *СТОП* и убедится, что остановка электропривода происходит в соответствии со значением параметра ***Cd07***.

4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

В отчете необходимо привести структурную схему и схему подключения ПЧ ВЕСПЕР EI-8001, значения заданных параметров настройки и выводы по работе.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Какова главная функция шкафов управления насосами водоснабжения?
3. Перечислите основные функции шкафов управления наосами водоснабжения
4. За счет чего непрерывные ПИД и ПИ законы регулирования давления в системе водоснабжения имеют преимущества по сравнению с позиционным законом?
5. Для каких целей осуществляется «плавный пуск» асинхронных электроприводов?
6. Основные подсистемы преобразователей частоты для асинхронных электроприводов

7. Опишите кратко методику настройки преобразователя частоты ВЕСПЕР EI-8001

Лабораторная работа № 13
ИССЛЕДОВАНИЕ ПИ–РЕГУЛЯТОРА ДАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить методику настройки ПИ–регулятора преобразователя частоты для асинхронного электропривода, экспериментальным путем оценить показатели качества процесса регулирования после настройки

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Законы управления напряжения/частота, реализуемые в векторных преобразователях частоты

Рассмотрим кратко конструкцию асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором (рисунок 131). Неподвижный статор содержит трехфазную обмотку, фазы которой сдвинуты друг относительно друга на 120^0. Ротор (подвижная часть электродвигателя) имеет короткозамкнутую обмотку.

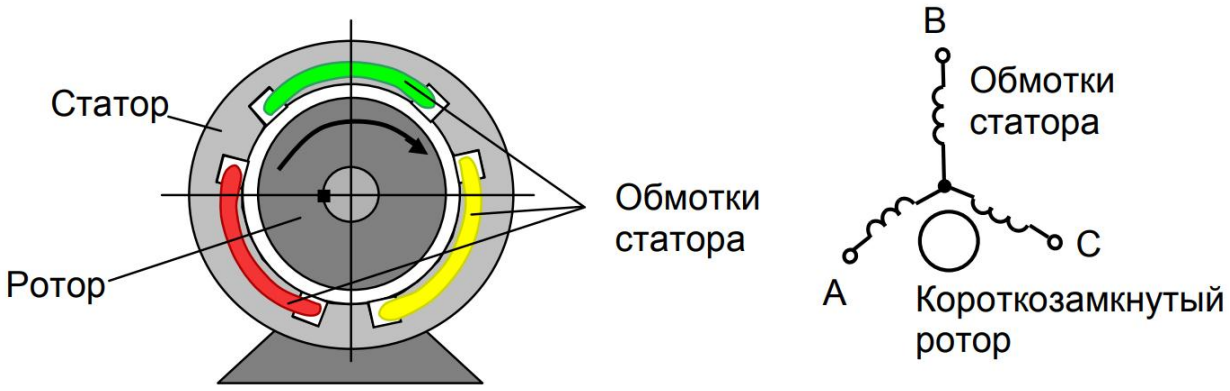


Рисунок 131 – Устройство асинхронного электропривода с короткозамкнутым ротором

На обмотки статора подается трехфазное напряжение величиной U_A, U_B, и U_C и частотой f. Такая конструкция обеспечивает вращение магнитного поля статора с частотой n_1 (в оборотах в минуту), которая зависит от схемы намотки (числа пар полюсов p) и частоты подаваемого трехфазного напряжения:

$$n_1 = \frac{60f}{p}, \text{ об/мин}$$

Частота вращения n_1 называется синхронной и при частоте сети 50 Гц для обмоток с одной парой полюсов (p=1) равна 3000 об/мин, для p=2 ─ 1500 об/мин и т.д. Ротор синхронного электродвигателя вращается с синхронной частотой, а в асинхронном электродвигателе частота вращения ротора n_2 в установившемся режиме отличается от синхронной частоты n_1 на величину скольжения s.

Таким образом, частота вращения ротора как синхронного, так и асинхронного электродвигателя зависит от частоты питающего трехфазного напряжения. На этой зависимости основан принцип действия преобразователей частоты, причем для электродвигателей с короткозамкнутым ротором это наиболее эффективный способ регулирования частоты вращения ротора.

В преобразователях частоты для асинхронных двигателей применяется два принципа управления электронными ключами, формирующими трехфазную систему напряжений: *скалярное* и *векторное*.

При *скалярном* управлении амплитуда U и частота f приложенного к двигателю напряжения изменяется по определенному закону, выраженному через отношение U/f=const. Это означает, что напряжение и частота изменяются пропорционально, чтобы поддерживать постоянное отношение между ними, что позволяет управлять магнитным потоком в двигателе и, соответственно, его скоростью вращения. Изменение частоты питающего напряжения приводит к отклонению от расчетных значений максимального и пускового моментов двигателя, к.п.д., коэффициента мощности. Поэтому для поддержания требуемых рабочих характеристик двигателя необходимо с изменением частоты одновременно изменять и амплитуду напряжения. В существующих преобразователях частоты при скалярном управлении чаще всего поддерживается постоянным отношение максимального момента двигателя к моменту сопротивления на валу. То есть при изменении частоты амплитуда напряжения изменяется таким образом, что отношение максимального момента двигателя к текущему моменту нагрузки остается неизменным. Это отношение называется «перегрузочная способность двигателя».

При постоянстве перегрузочной способности номинальные коэффициент мощности и к.п.д. двигателя на всем диапазоне регулирования частоты вращения практически не изменяются. Максимальный момент, развиваемый двигателем, определяется следующей зависимостью:

$$M_{макс.} = k\frac{U^2}{f^2},$$

где k – постоянный коэффициент.

Таким образом, зависимость напряжения питания от частоты определяется характером нагрузки на валу электрического двигателя. Для постоянного момента нагрузки поддерживается отношение U/f = const, и, по сути, обеспечивается постоянство максимального момента двигателя.

Однако на небольших частотах максимальный момент двигателя уменьшается. Для компенсации этого явления и для увеличения пускового момента используется повышение величины питающего напряжения. Для вентиляторной нагрузки используется зависимость U/f^2 = const. В области малых частот максимальный момент также уменьшается, но для вентиляторной нагрузки это некритично, так как при этом момент сопротивления рабочей машины незначителен. Используя зависимость максимального крутящего момента от напряжения и частоты, можно задать закон U от f для любого типа нагрузки. Важным достоинством скалярного метода является возможность одновременного управления группой электродвигателей. Скалярное управ-

ление обычно достаточно для большинства практических случаев применения частотно регулируемого электропривода с диапазоном регулирования частоты вращения двигателя до 1: 40.

Векторное управление значительно расширяет диапазон регулирования, повышает точность и быстродействие электропривода. Этот метод позволяет напрямую управлять вращающим моментом двигателя, который определяется током статора, создающим магнитное поле. Для управления моментом необходимо регулировать не только амплитуду, но и фазу статорного тока, то есть его вектор, что и дало название этому методу – «векторное управление».

Чтобы управлять вектором тока и контролировать положение магнитного потока статора относительно ротора, требуется точная информация о положении ротора в каждый момент времени. Это достигается либо с помощью внешнего датчика положения ротора, либо путем расчетов на основе других параметров двигателя, таких как токи и напряжения статорных обмоток.

Более экономичным решением является частотно-регулируемый электропривод с векторным управлением без датчика скорости. Однако такой подход требует от преобразователя частоты значительных вычислительных ресурсов и высокой скорости обработки данных. Кроме того, при низких скоростях вращения, близких к нулю, работа электропривода без обратной связи по скорости невозможна.

Векторное управление с датчиком обратной связи по скорости обеспечивает широкий диапазон регулирования (до 1:1000 и выше), высокую точность регулирования скорости (до сотых долей процента) и момента (до единиц процентов).

2.2 ПИ–регулирование давления в подающем трубопроводе системы водоснабжения

Применительно к частотно-регулируемому электроприводу системы водоснабжения в качестве объекта управления ОУ по давлению P в подающем трубопроводе рассматривается электронасосный агрегат. Управляемой величиной является давление, а управляющим воздействием – частота напряжения питания обмотки статора f (точнее, частота и напряжение, так как для обеспечения энергетических характеристик электродвигателя, близких к номинальным при отличных от 50 Гц частотах необходимо также изменять по определённому закону и напряжение). На величину давления в подающем трубопроводе оказывает влияние расход воды потребителями Q, который является возмущающим воздействием. Для обеспечения обратной связи по величине давления используется воспринимающий элемент (датчик), преобразующий величину давления в унифицированный сигнал. Примем в качестве сигнала от датчика распространённый в автоматизации стандарт «токовая петля» 4..20 мА. Таким образом, структурную схему системы регулирования можно представить в виде, показанном на рисунке 132.

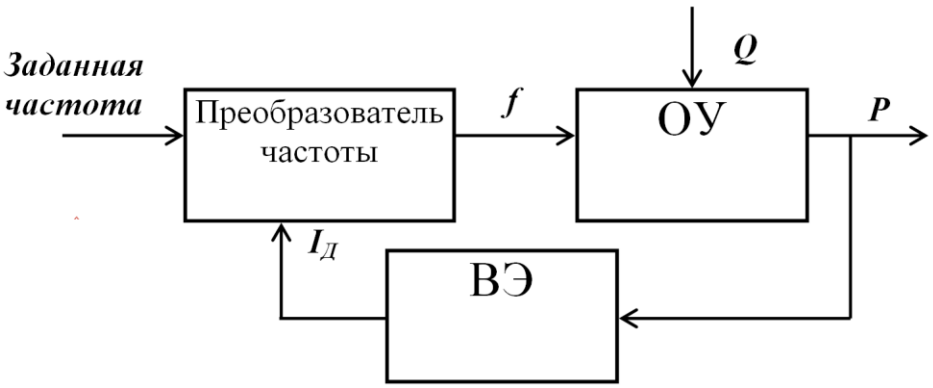
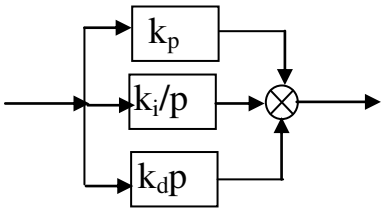


Рисунок 132 – Структурная схема автоматической системы регулирования

Величина управляющего воздействия *f* вырабатывается по определённому закону, который называется *закон регулирования.* В современные преобразователи частоты, как правило, встраивается в виде программного обеспечения микропроцессора типовой ПИД – закон регулирования (пропорционально– интегрально– дифференциальный). ПИД–регулятор имеет структурную схему и передаточную функцию, показанную на рисунке 133.



а)

$$W_{pid}(p) = k_p + \frac{k_i}{p} + k_d p$$

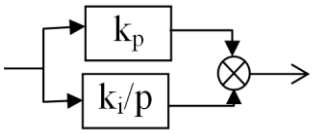
б)

Рисунок 133 – Структурная схема (*а*) и передаточная функция (*б*) ПИД–регулятора

Регулятор, включенный в АСР, может иметь несколько настроечных коэффициентов (например, ПИД–регулятор – три), изменяющихся в широких пределах. В ПИД регуляторе настроечными параметрами являются коэффициенты пропорциональной k_p, интегральной k_i и дифференциальной k_d частей передаточной функции. При этом при определённых значениях настроек система управления будет управлять объектом в соответствии с технологическими требованиями, при других может привести к неустойчивому состоянию. Поэтому стоит задача не только определить настройки, соответствующие устойчивой системе, но и выбрать из них оптимальные. Оптимальными настройками регулятора являются такие, которые соответствуют минимуму (или максимуму) какого–либо показателя качества.

Требования к показателям качества устанавливаются исходя из требований технологии. Чаще всего накладываются огарничения на время регулирования (минимум) и перерегулирование. Изменяя настройки таким образом, чтобы уменьшить перегулировнаие, мы можем прийти к слишком большому времени регулирования, что нецелесообразно. И наоборот, стремясь уменьшить время регулирования, мы получаем более колебательные процессы.

Сложность настройки регулятора зависит от количества настроечных параметров, поэтому часто применяются П–, ПИ–, ПД–регуляторы. В системах водоснабжения время переходного процесса, определяемое инерционностью элементов, существенно за счет наличия гидробака, протяженного трубопровода и ограниченной скоростью нарастания частоты и напряжения на выходе преобразователя частоты (это так называемый «плавный пуск»). Поэтому распространённым решением является использование ПИ–регулятора вместо ПИД (рисунок 134).



а)

$$W_{pi}(p) = k_p + \frac{k_i}{p}$$

б)

Рисунок 134 – Структурная схема (*а*) и передаточная функция (*б*) ПИ-регулятора.

Наличие в ПИ–регуляторе интегральной составляющей позволяет скомпенсировать статическую ошибку регулирования, однозначно связанную с рассогласованием *e*, т.е. повысить точность поддержания давления (рисунок 135).

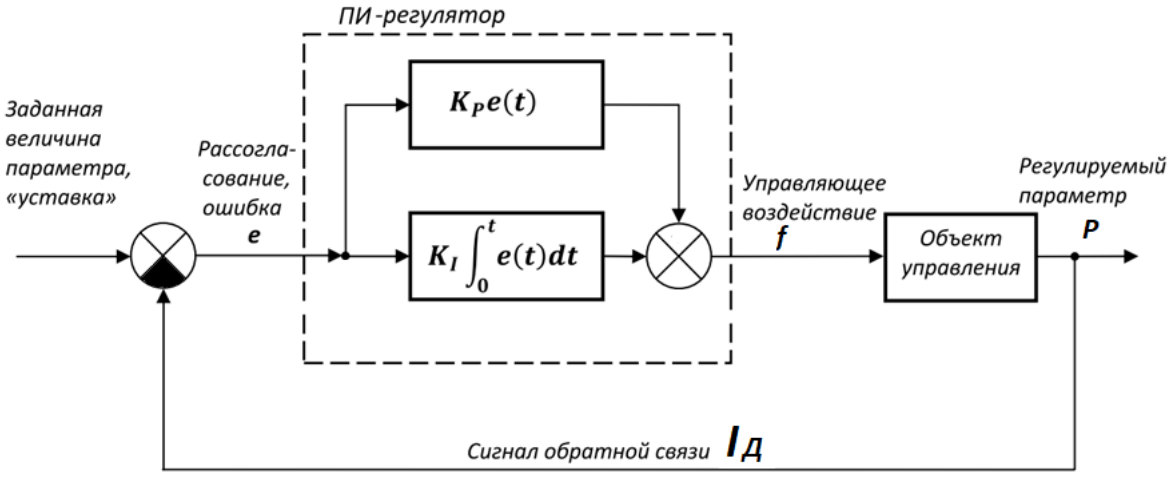


Рисунок 135 – Упрощенная структурная схема ПИ–регулятора

Как показано на рисунке 135, выходная величина регулятора *f* пропорциональна интегралу по времени от отклонения регулируемой величины. Она позволяет регулятору со временем учесть статическую ошибку регулирования и устранить её.

Если система не испытывает внешних возмущений, то через некоторое время значение технологического параметра стабилизируется на заданном уровне, сигнал на выходе пропорциональной составляющей будет равен нулю, а выходной сигнал будет полностью обеспечиваться интегральной составляющей. Тем не менее, интегральная составляющая также может приводить к автоколебаниям при неправильном выборе её коэффициента.

Таким образом, если использовать два программных блока – пропорциональный и интегральный, то точность процесса регулирования, а соответственно и точность поддержания значения технологического параметра значительно повысится. Степень компенсации статической ошибки регулирования прямо пропорциональна значению коэффициента K_i. Но чем он выше, тем медленнее будут протекать переходные процессы при очередном запуске системы или при внешних возмущениях. ПИ–регулятор подходит для систем автоматического регулирования, где не важна скорость её реакции, что и определяет его применение в системах водоснабжения со значительным временем передаточного (транспортного) запаздывания в трубопроводах.

Интегральная составляющая имеет существенное значения именно с ростом длительности переходного процесса, в то время как дифференцирующая – в динамических режимах, позволяя уменьшить перерегулирование (максимальную величину колебаний давления), которое также компенсируются гидробаком, трубопроводом и ограничением на скорость изменения частоты самого преобразователя. Проще было бы использовать П–регулятор, однако значение выходного сигнала П–регулятора не бывает равным заданию, так как постоянно будет возникать статическая ошибка регулирования. Точность поддержания значения технологического параметра можно повысить увеличением значения коэффициента k_i, однако при слишком больших значениях могут возникнуть автоколебания в контуре регулирования, и система потеряет устойчивость. П-регулятор подходит для систем, где не важна высокая точность поддержания значения технологического параметра.

Общие рекомендации по настройке преобразователей частоты в системе автоматического регулирования обычно приводятся в технической документации производителей. Процесс настройки ПИ–регулятора состоит в основном из задания уставки и оптимальных значений коэффициентов настройки. Существуют математические методы вычисления оптимальных коэффициентов ПИД–регуляторов исходя из обеспечения наибольшей устойчивости системы, однако на практике настройка регулятора часто проводится эмпирическим методом.

Также при настройке преобразователей частоты необходимо задавать общие параметры электропривода: номинальный ток электродвигателя, номинальное напряжение электродвигателя, значение питающего напряжения и другие, необходимые для корректной работы преобразователя частоты и всей системы.

2.3 Настройка ПИ–регулятора преобразователя частоты ВЕСПЕР EI-8001

Для активизации режима ПИ-регулирования по сигналу обратной связи от датчика давления должны быть установлены следующие значения параметров:

– режим управления с обратной связью ;

– функции логических кнопок 7-9 (см. рисунки 128 и 136):

C d 3 3 = o F F или r r S,

C d 3 5 = o F F или F S t,

C d 3 4 = o F F или d C I;

– сигнал датчика обратной связи стандарта 4..20 мА C d 3 8 = 4.

Задание уровня технологического параметра (давления) осуществляется путем установки опорной частоты внешним потенциометром *R1* подачей на вход 2 сигнала 0...+10 В постоянного тока (см. рисунок 124 и 128). При этом максимальной опорной частоте (константа C d 2 9) соответствует максимальный выходной сигнал датчика давления. В режиме управления с обратной связью опорная частота (задание) на дисплее частотного преобразователя не индицируется. Сигнал от датчика обратной связи 4...20 мА подается на вход 4 ПЧ (рисунки 124, 128).

Взаимодействие параметров настройки ПИ–регулятора иллюстрируются структурной схемой, показанной на рисунке 136. На **Вх 2** подается сигнал в виде постоянного напряжения от задающего потенциометра щита управления, к **Вх 4** подключен датчик давления. Параметр C d 2 2 задает коэффициент усиления обратной связи, C d 2 0 - коэффициент пропорциональной части и коэффициент C d 2 1 - коэффициент интегрирующей части ПИ-закона регулирования.

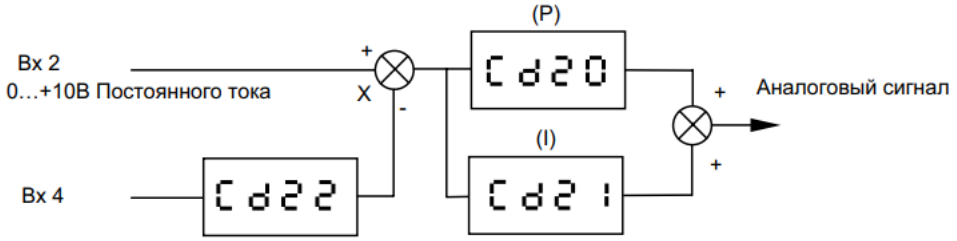


Рисунок 136 – Коэффициенты настройки ПИ-регулятора

2.4. Анализ переходных характеристик при помощи программы DAQNavi Data Logger

Для фиксации переходных характеристик изменения давления используется многофункциональная плата ввода-вывода PCI-1711LS, установленная в персональный компьютер. Плата имеет в своем составе аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Так как на АЦП нужно подавать сигнал в виде напряжения, то используется блок сопряжения с датчиком давления, у которого выходной сигнал – ток. В блоке сопряжения находится коммутационная плата, шунт и резистивно-емкостный НЧ-фильтр для уменьшения помех от наводок переменного напряжения питания электропривода (рисунки 125, 137, 138).

Основной характеристикой фильтра является частота среза, которая определяется как частота, на которой значение АЧХ фильтра падает до $1/\sqrt{2} = 0{,}707$ от своей величины в полосе пропускания. Она также называется «точкой 3 дБ» (поскольку 20lg (0,707) = –3). Частота среза определяется по формуле:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Например, при использовании резистора $R_ф$ величиной 2 кОм и конденсатора *C1* величиной 47мкФ частота среза будет равна 1,69 Гц. Таким образом, НЧ-фильтр будет пропускать частоты меньше 1,69 Гц и задерживать частоты больше этой величины.

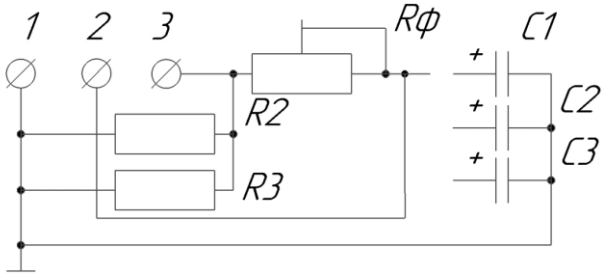


Рисунок 137 – Схема принципиальная блока сопряжения

Как видно из схемы блока сопряжения (рисунок 137), шунт образован параллельным соединением двух резисторов R_1 и R_2 номиналом 1 кОм для получения сопротивления 0,5 кОм и соответственно преобразования максимальной величины тока датчика 20 мА в напряжение 10 В. НЧ-фильтр образован подстроечным резистором $R_ф$ и конденсаторами C_1, C_2, C_3. Такое решение позволяет изменять частоту среза фильтра при помощи изменения сопротивления $R_ф$ и/или подключения одного из конденсаторов.

Блок сопряжения (рисунок 138) выполнен в корпусе, на передней панели которого расположены клеммы, подстроечный резистор и переключатель емкости конденсатора фильтра. Клеммы 1 и 3 (рисунок 137) используются для подключения к датчику давления, а выходной сигнал, преобразованный в напряжение и отфильтрованный, подается на вход одного из аналоговых входов коммутационной платы, а затем на вход АЦП.

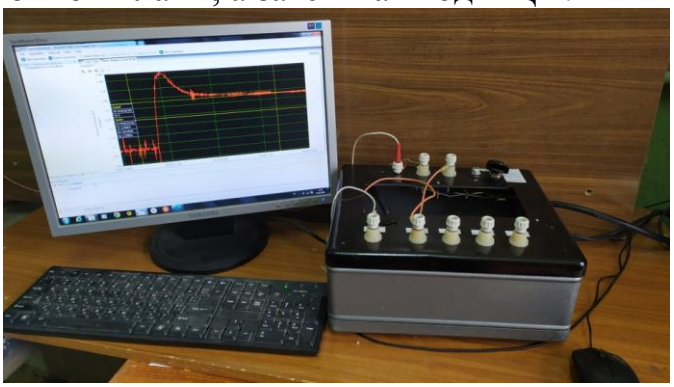


Рисунок 138 – Блок сопряжения и монитор ПК с переходной характеристикой

Для отображения на экране ПК и сохранения данных, поступающих с АЦП, в виде текстового файла, используется утилита DAQNavi Data Logger из пакета программного обеспечения платы PCI–1711LS. При запуске программы отображается окно, показанное на рисунке 139.

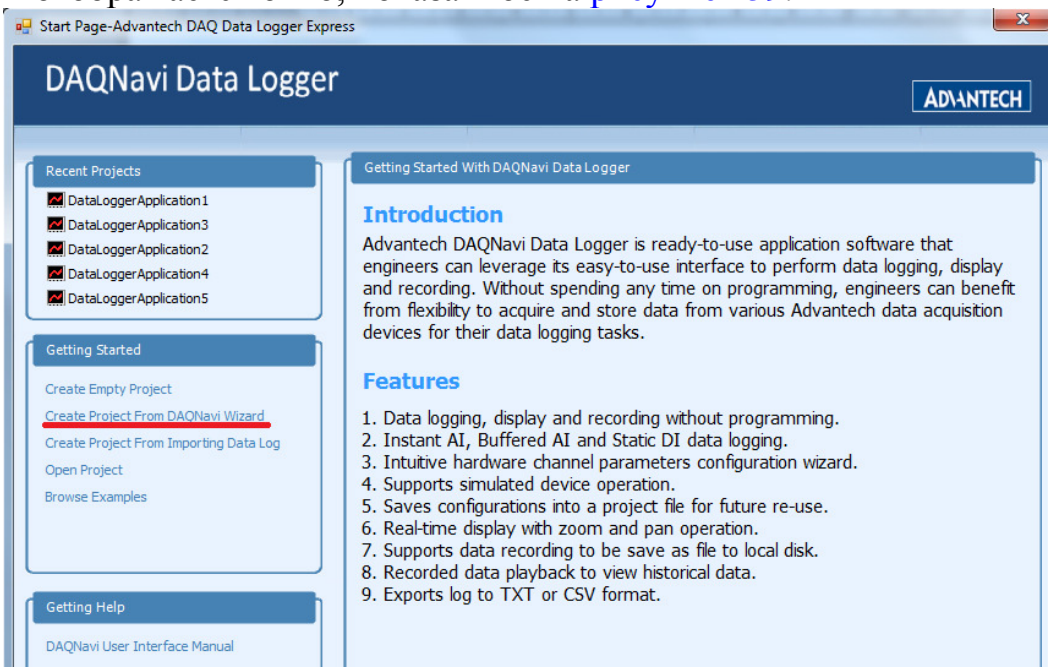


Рисунок 139 – Стартовое окно утилиты DAQNavi Data Logger

Для того, чтобы настроить программу DAQNavi Data Logger на отображение измеряемых данных, нужно выполнить первоначальную настройку в следующей последовательности:

1) Выбрать пункт **Create Project From DAQNavi Wizard** (*Создать проект с помощью мастера DAQNavi*, рисунок 139).
2) В открывшемся окне (рисунок 140) выбрать опцию **Analog Input whith a HW Timer** (*Аналоговый вход с HW-таймером*) и нажать кнопку **Next**.

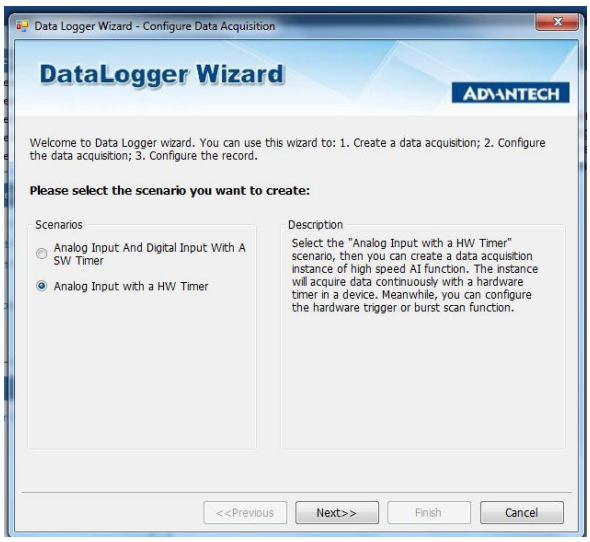


Рисунок 140 – Окно выбора сценария наблюдений (data acguisition) утилиты DAQNavi Data Logger

3) В открывшемся окне (рисунок 141) выбрать устройство ввода, к которому подключен датчик (в нашем случае это плата PCI–1711L) и нажать кнопку **Next** (Следующий).

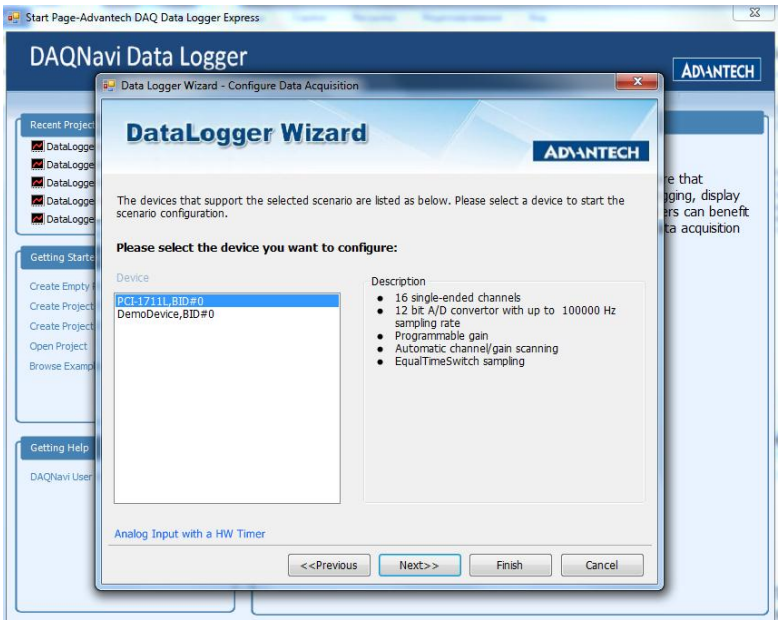


Рисунок 141 – Окно выбора устройства ввода данных утилиты DAQNavi Data Logger

4) В открывшемся окне (рисунок 142) открыть вкладку **Conversion** (*Преобразование*), установить опции **Start Channel To Scan** (*Начальный канал для сканирования*), **Channel Count to Scan** (*Количество каналов для сканирования*), **Convert Clock Sourse** (*Источник тактовых импульсов*), **Convert Clock Rate** (*Частота дискретизации сигнала*) в соответствии с рисунком 142 и нажать кнопку **Finish** (*Окончание*).

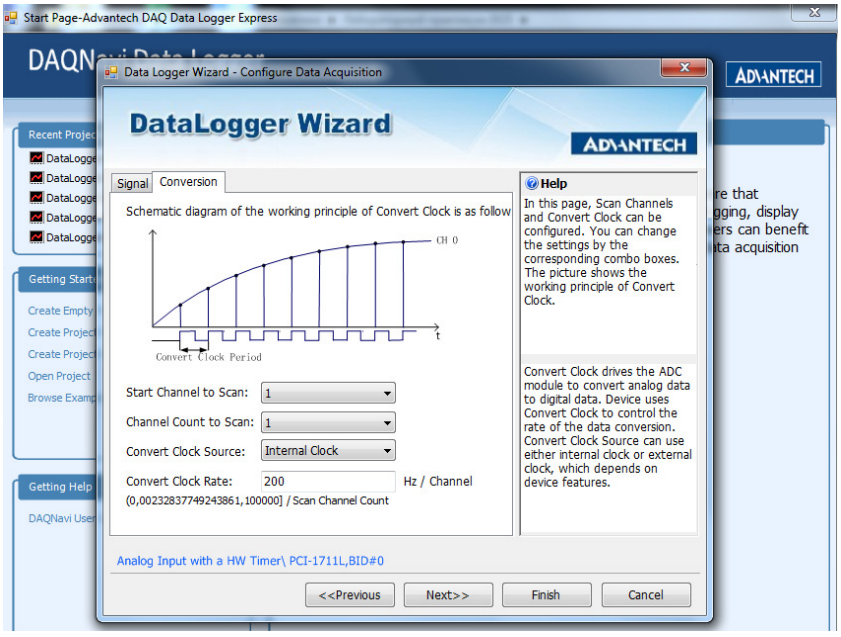


Рисунок 142 – Окно настройки параметров работы платы PCI – 1711LS

5) Для начала считывания поступающих с датчика сигналов в соответствии с произведенными настройками сканирования каналов в основном окне DAQNavi Data Logger (рисунок 143) нужно нажать кнопку **Start Acquisition** (*Начать сбор данных*). В процессе считывания данных с АЦП кнопка **Start Acquisition** изменится на **Stop Acquisition** (*Остановить сбор данных*).

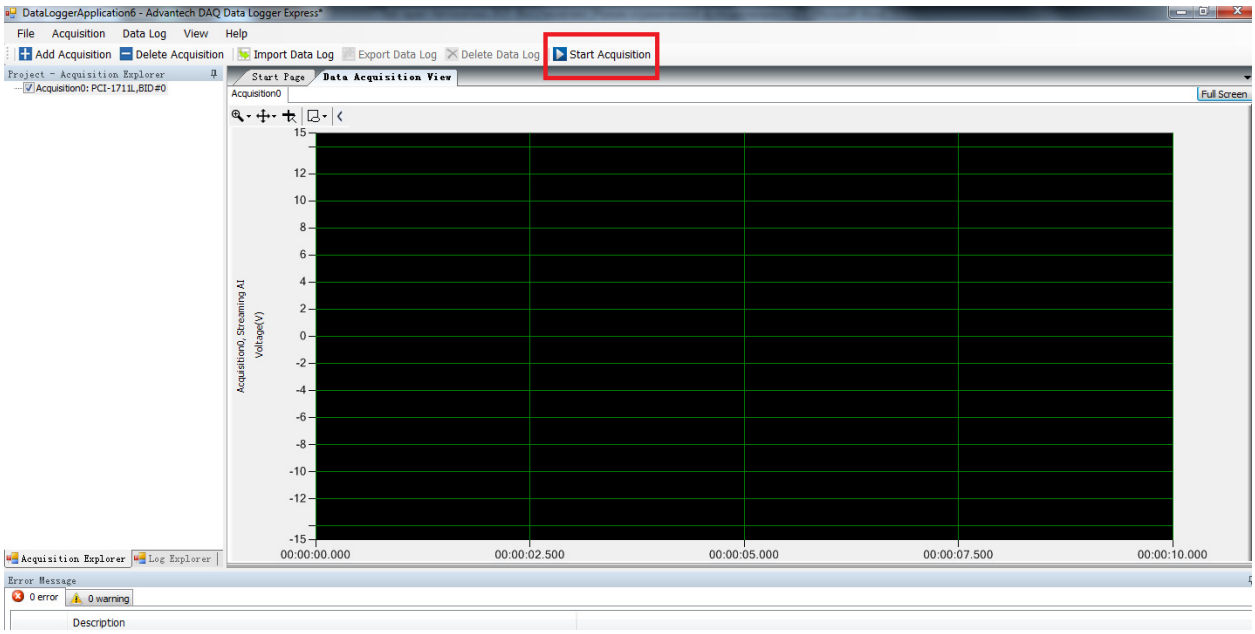


Рисунок 143 – Основное окно утилиты DAQNavi Data Logger

6) Для анализа переходной характеристики удобно использовать опцию **Visible Cursor** (*Видимый курсор*, рисунок 144), при помощи которой можно определять координаты двух точек на графике, а также отклонение между координатами точек по вертикали и горизонтали (рисунок 145).

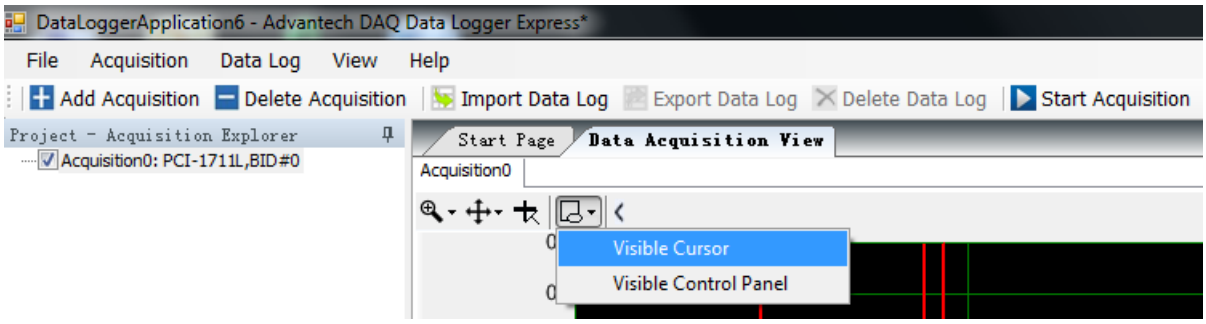


Рисунок 144 – Активация опции **Visible Cursor**

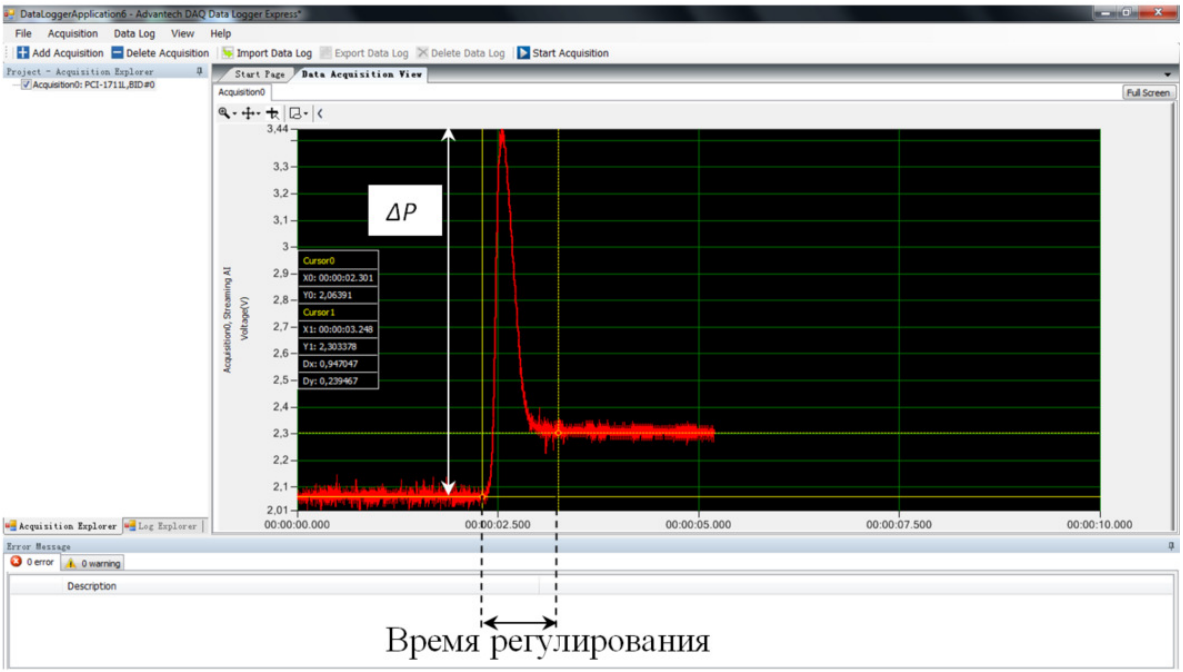


Рисунок 145 – Пример определения показателей качества переходного процесса (координат характерных точек и отклонений между ними)

3 ПРОГРАММА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. По материалам пособия изучить принцип действия, схему подключения и методику настройки преобразователя частоты ВЕСПЕР EI-8001.
2. Включить питание лабораторного стенда.
3. Установить значения параметров настройки ПЧ в режиме ПИ–регулирования в соответсвии с таблицами 8 и 9 (*остальные параметры не изменять!*):

Таблица 8 – Основные параметры настройки ПЧ

Код параметра	**Функция**	**Значение параметра**
1	2	3
Cd06	Время разгона, с	0,5 с
Cd07	Время торможения, с	0,5 с
Cd08	Минимальная частота, Гц	0
Cd09	Максимальная частота, Гц	50
Cd37	Активация режима ПИ–регулирования при подключении датчика обратной связи к входам 3,4	PIF (ПИ–регулирование активировано)
Cd33, ***Cd34*** ***Cd35***	Переназначение логических входов	OFF (не используется) OFF (не используется) OFF (не используется)

Продолжение таблицы 8

1	2	3
Cd22	Коэффициент усиления обратной связи	1
Cd20	Коэффициент пропорциональной части ПИ–закона регулирования.	Согласно заданному варианту (таблица 9)
Cd21	Коэффициент интегрирующей части ПИ–закона регулирования.	Согласно заданному варианту (таблица 9)

Таблица 9 – Варианты коэффициентов настройки ПИ–регулятора

Вариант	**Величина k_p (*Cd20*)**	**Величина k_i (*Cd21*)**
1	0,5	1
2	1	2,5
3	1,5	5
4	2	10
5	2,5	15
6	3	20
7	3,5	25
8	4	30
9	4,5	35
10	5	40

4. Закрыть дверцу шкафа управления, открыть вентиль подачи воды. Нажать кнопку *ПУСК* на щите управления. При помощи потенциометра «*Уставка по час*тоте» установить номинальную частоту вращения при полностью открытом вентиле (должен загореться индикатор «*Частота достигнута*»).
5. Закрывая и открывая вентиль подачи воды убедиться, что ПИ–регулятор обеспечивает регулирование, останавливая электропривод при полностью закрытом вентиле и разгоняя до номинальной частоты вращения при полностью открытом.
6. Остановить электропривод, нажав кнопку *СТОП* на щите управления.
7. Загрузить программу DAQNavi Data Logger и произвести ее настройку в соответствии с описанной в теоретической части методикой.
8. Открыть вентиль подачи воды, включить электропривод насоса кнопкой *ПУСК* на щите управления и после достижения электроприводом номинальной частоты вращения (должен загореться индикатор «*Частота достигнута*» на щите управления) запустить процесс измерения величины давления кнопкой **Start Acquisition** в основном окне программы DAQNavi Data Logger.
9. Убедившись, что на графике программы DAQNavi Data Logger отображается процесс измерения, закрыть вентиль подачи воды и после полной остановки насоса остановить процесс измерения кнопкой **Stop Acquisition** программы DAQNavi Data Logger.

10. Остановить электропривод насоса, нажав кнопку СТОП на щите управления.
11. Определить показатели качества переходного процесса в соответствии с рисунком 145. При помощи тарировочной характеристики определить величину колебания давления в единицах давления (МПа).
12. Повторить пункты 16-19 и определить среднее значение показателей качества по 5 измерениям.
13. Оформить отчет.

4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

В отчете необходимо привести упрощённо структурную схема ПИ–регулятора, значения заданных параметров настройки преобразователя частоты, скриншот одного из вариантов переходной характеристики в программе DAQNavi Data Logger, измеренные и усреднённые значения показателей качества процесса регулирования давления, выводы по работе.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как зависит частота вращения ротора от частоты питающего напряжения?
2. В чем разница между «скалярным» и «векторным» управлением в преобразователях частоты?
3. Почему в системах водоснабжения чаще применяют «ПИ–регулятор», а не ПИД?
4. Как интегральная составляющая в ПИ–регуляторе влияет на статическую ошибку?
5. Какие проблемы могут возникнуть при слишком большом коэффициенте Ki?
6. Как работает блок сопряжения с АЦП? Зачем нужен НЧ–фильтр?
7. Как строится тарировочная характеристика датчика давления?
8. Какие показатели качества переходного процесса оцениваются?
9. Почему при полностью закрытом вентиле электропривод останавливается?
10. Как влияет гидробак и трубопровод на динамику системы?
11. Почему в системах водоснабжения важно ограничивать скорость изменения частоты?

Литература

1. Лебедев, К.Н. Автоматизация управления технологическими процессами: учебное пособие / К.Н. Лебедев. – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2013. – 153 с.

2. Лабораторный практикум по автоматике. Часть 1. Технические средства автоматики: учебное пособие; под ред. Б.А. Карташова. – Зерноград, АЧГАА, 2002. – 116 с.

3. Карташов, Б.А. Лабораторный практикум по автоматике. Часть 2. Моделирование и эксперимент в автоматике: учебное пособие / Б.А. Карташов, Г.С. Пархоменко, С.Г. Пархоменко; под ред. Б.А. Карташова. – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2003. – 151 с.

4. Карташов, Б.А. Изучение двухканального измерителя-регулятора ТРМ-202 Щ2.РР: методические указания к лабораторной работе / Б.А. Карташов, С.А. Бузун. – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2008. – 18 с.

5. Панев, Б.А. Изучение программных таймерных устройств: методические указания к лабораторной работе / Б.А. Панев. – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2008. – 23 с.

6. Лебедев, К.Н. Автоматика: лабораторный практикум. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2017. – 117 с.

7. Лабораторный практикум по автоматике. / Б. А.Караташов, Н. В. Ксенз, А.Н. Васильев, В.В. Коптев, С.Б. Панев.- Зерноград, РИО АЧГАА, 1999 г. – 312 с.

8. Автоматизированный стенд для проведения лабораторных работ по электротехническим дисциплинам. / К.Н. Лебедев, П.К. Лебедев. // Агротехника и энергообеспечение. - Орел: Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, 2020. - №4(29) - С. 64-71.

9. Автоматизированный стенд для проведения лабораторных работ по изучению двухпозиционных регуляторов. / К.Н. Лебедев, П.К. Лебедев. // Агротехника и энергообеспечение. - Орел: Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, 2023. - №1(38) - С. 81-87.

10. Экспериментальные исследования процесса ПИ–регулирования давления в системе водоснабжения с преобразователем частоты. / К.Н. Лебедев, С.И. Носов. // Активная Честолюбивая Интеллектуальная Молодежь Сельскому Хозяйству (АЧИМСХ).– Зерноград: АЧИИ ФГБОУ ВО Донской ГАУ. – 2024. – № 1 (16). – С. 26-31.

11. Автоматизированный стенд для проведения лабораторных работ по изучению ПИ–регуляторов давления в системе водоснабжения на базе трехфазного асинхронного электропривода насоса и преобразователя частоты. / К.Н. Лебедев, П.К. Лебедев. // Агротехника и энергообеспечение. – 2024. – № 1(42). – С. 37-42.

Учебное издание

Лебедев Константин Николаевич
кандидат технических наук, доцент

АВТОМАТИКА

Лабораторный практикум

Издается в авторской редакции

Объем ЭИ: 7,93 Мб
Формат ЭИ: Portable Document Format (PDF)

Вернуться к содержанию