

Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь»

А.Г. Прохоренко, А.С. Яковлева

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ  
ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ**

Методическое пособие  
по выполнению контрольной работы

Хабаровск  
Издательство ДВГУПС  
2018

УДК 681.5(075.8)  
ББК 3965–04я73  
П 84

Рецензент – доктор технических наук, заведующий кафедрой  
«Автоматика, телемеханика и связь» ДВГУПС  
профессор *А.И. Годяев*

**Прохоренко, А.Г.**

П 84 Расчет параметров элементов систем автоматики и телемеханики : метод. пособие / А.Г. Прохоренко, А.С. Яковлева. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2018. – 49 с.

Методическое пособие соответствует рабочей программе дисциплины «Элементы систем автоматики и телемеханики».

Описаны физическая природа работы различных типов датчиков, их применение и особенности работы; для ряда датчиков приведены формулы для расчета основных параметров, а также примеры расчета.

Предназначено для студентов 3-го курса заочной формы обучения по специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов».

УДК 681.5(075.8)  
ББК 3965–04я73

© ДВГУПС, 2018

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящее методическое пособие разработано для студентов заочной формы обучения, выполняющих контрольные работы, предусмотренные программой дисциплины «Элементы систем автоматики и телемеханики», и предназначено для реализации государственных требований к высшему профессиональному образованию.

Для успешного выполнения заданий контрольной работы студент должен:

*знать:*

- типы электромеханических и магнитных устройств автоматики;
- разновидности систем автоматики;
- конструктивные разновидности устройств автоматики;
- схемные решения устройств и систем автоматики;
- основные характеристики и параметры устройств автоматики;
- классификацию систем автоматики;

*уметь:*

- пользоваться специальной и справочной литературой;
- строить характеристики устройств автоматики;
- рассчитывать основные параметры устройств и систем автоматики;
- различать системы стабилизации, следящие, автоматические измерительные системы;
- производить сравнительный анализ основных параметров устройств автоматики.

Контрольная работа состоит из 7 заданий. В каждом задании необходимо привести схему исследуемого датчика или устройства, характеристику его параметров и сформулировать выводы по полученным после соответствующего расчета данным. Варианты заданий выбираются по последним цифрам шифра зачетной книжки студента. В каждом разделе приведен список вопросов для самостоятельной подготовки, которые направлены на закрепление теоретических знаний по изучаемым устройствам.

При выполнении контрольной работы рекомендуем воспользоваться дополнительной литературой [1–12].

# 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОГО И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКОВ

## 1.1. Принцип построения потенциометрических датчиков

Потенциометрический датчик представляет собой переменный резистор, к которому приложено питающее напряжение, его входной величиной является линейное или угловое перемещение токоъемного контакта, а выходной величиной – напряжение, снимаемое с этого контакта, изменяющееся по величине при изменении его положения.

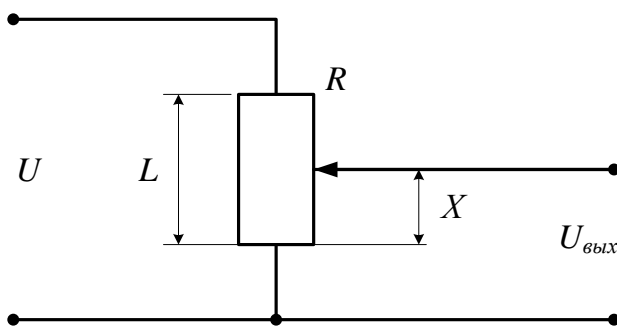


Рис. 1.1. Электрическая схема потенциометрического датчика:  $R$  – резистивный элемент;  $L$  – рабочая длина каркаса;  $X$  – величина перемещения

Потенциометрические датчики предназначены для преобразования линейных или угловых перемещений в электрический сигнал, а также для воспроизведения простейших функциональных зависимостей в автоматических устройствах и автоматических устройствах непрерывного типа. Электрическая схема простейшего потенциометрического датчика приведена на рис. 1.1.

По способу выполнения сопротивления потенциометрические датчики делятся:

- на ламельные с постоянными сопротивлениями;
- проволочные с непрерывной намоткой;
- датчики с резистивным слоем.

Конструктивно потенциометрический датчик состоит из каркаса, на который намотана в один слой обмотка из тонкого провода. По виткам обмотки скользит движок (щетка), который механически связан с объектом, перемещение которого надо измерить. Обмотка выполнена из изолированного провода, а дорожка, по которой скользит движок, предварительно очищена от изоляции. Каркас выполнен обычно плоским или в виде цилиндра. Материалом каркаса может быть изолятор (текстолит, гетинакс, пластмасса, керамика) или металл, покрытый слоем изоляции. Металлические каркасы благодаря лучшей теплопроводности позволяют получить большую мощность электрического сигнала на выходе датчика. В качестве материала для такого каркаса может быть нанесен слой оксидированного алюминия толщиной около 10 мкм.

## ***Разновидности наиболее распространенных типов потенциометрических датчиков.***

1. **Ламельные потенциометрические датчики** использовались для проведения относительно грубых измерений из-за ряда конструктивных недостатков. В таких датчиках постоянные резисторы, подобранные по номиналу специальным образом, припаиваются к ламелям. Ламель представляет собой конструкцию с чередующимися проводящими и непроводящими элементами, по которой скользит токосъемный контакт. При движении токосъемника от одного проводящего элемента к другому суммарное сопротивление подключенных к нему резисторов меняется на величину, соответствующую номиналу одного сопротивления.

2. **Проволочные потенциометрические датчики** предназначены для более точных измерений. Чаще всего конструкции представляют собой каркас из гетинакса, текстолита или керамики, на который в один слой, виток к витку намотана тонкая проволока, по зачищенной поверхности которой скользит токосъемник. Материалы провода: манганин, фехраль или сплавы на основе благородных металлов. Токосъемник выполнен из более мягкого материала, чтобы исключить перетирание провода.

3. **Многооборотный потенциометр.** Обычные потенциометрические датчики имеют ограниченный диапазон работы, так как его величина задана геометрическими размерами каркаса и числом витков обмотки. Поэтому нашли применение многооборотные потенциометрические датчики, у которых резистивный элемент свит по винтовой линии с несколькими витками, их ось должна повернуться несколько раз, чтобы движок переместился с одного конца обмотки на другой, т.е. электрический диапазон таких датчиков кратен 360°. Основным достоинством многооборотных потенциометров является высокая разрешающая способность и точность, что достигается благодаря большой длине резистивного элемента при малых общих габаритах.

4. **Функциональные потенциометрические датчики** применяют для получения выходного сигнала, изменяющегося по определенному закону. В этих датчиках зависимость сопротивления обмотки от перемещения движка является нелинейной. Требуемая нелинейность обеспечивается различными способами: изменением диаметра проволоки вдоль намотки; изменением шага намотки; применением каркаса определенной конфигурации; шунтированием участков линейных потенциометров сопротивлениями различной величины; изменением материала или размера провода.

5. **Фотопотенциометр** представляет собой бесконтактный аналог обычного потенциометра с резистивным слоем, механический контакт в нем заменен фотопроводящим, что, конечно, повышает надежность и

срок службы. Сигналом с фотопотенциометра управляет световой зонд, выполняющий роль движка. Он формируется специальным оптическим устройством и может смещаться в результате внешнего механического воздействия вдоль фотопроводящего слоя. В месте засветки фотослоя возникает избыточная по сравнению с темновой фотопроводимость и создается электрический контакт.

*Преимущества потенциометрических датчиков:* простота конструкции; малые габариты и вес; высокая степень линейности статических характеристик; стабильность характеристик; возможность работы на переменном и постоянном токе.

*Недостатки потенциометрических датчиков:* наличие скользящего контакта, который может стать причиной отказов из-за окисления контактной дорожки, перетирания витков или отгибания ползунка; погрешность в работе за счет нагрузки; сравнительно небольшой коэффициент преобразования; высокий порог чувствительности; наличие шумов; подверженность электроэрозии под действием импульсных разрядов.

## 1.2. Расчет параметров потенциометрического датчика

Потенциометрический датчик преобразует механические перемещения в изменения сопротивления реостата. Расчет потенциометра сводится к расчету сопротивлений: определяются размеры каркаса для намотки, диаметр провода обмотки, количество витков, шаг намотки.

Рабочая длина каркаса, мм,

$$L = \frac{\alpha D \pi}{360},$$

где  $\alpha$  – угол поворота;  $D$  – средний диаметр каркаса.

Минимальное число витков

$$n = \frac{100}{\delta_p},$$

где  $\delta_p$  – разрешающая способность, %.

Шаг намотки, мм,

$$\tau = \frac{L}{n}.$$

Диаметр провода с изоляцией, мм,

$$d_H = \tau - 0,015.$$

Коэффициент нагрузки

$$\beta = \frac{R_H}{R} = \frac{1 - \delta_{\max}}{4\delta_{\max}},$$

где  $\delta_{\max}$  – максимальная погрешность;  $R_H$  – номинальное сопротивление нагрузки;  $R$  – сопротивление потенциометра, Ом:

$$R = \frac{R_H}{\beta}$$

Высота каркаса, мм,

$$H = \frac{\pi R d^2}{8 \rho n} - b,$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление;  $b$  – толщина каркаса;  $d$  – диаметр провода.

Исходные данные для расчета взять из табл. 1.1 согласно варианту. Номер варианта определяется по последней цифре шифра зачетной книжки студента.

Таблица 1.1

### Исходные данные для расчета потенциометрического датчика

№ варианта	$R_H$ , Ом	$\delta_{\max}$ , %	$U$ , В	$D$ , мм	$\alpha$	$B$ , мм	$\delta_p$ , %	$\rho \cdot 10^{-6}$ , Ом·м
0	4400	2,0	26	50	330	1,8	0,2	0,49
1	4400	3,0	26	55	330	2,5	0,2	0,42
2	4400	2,7	26	47	330	1,5	0,23	0,49
3	4400	2,3	26	52	330	2,3	0,25	0,42
4	4400	2,1	26	49	330	2,0	0,21	0,42
5	4400	2,2	26	40	330	1,9	0,21	0,43
6	4400	2,5	26	54	330	2,1	0,23	0,41
7	4400	2,8	26	46	330	2,5	0,25	0,47
8	4400	2,3	26	53	330	1,7	0,24	0,45
9	4400	2,9	26	45	330	2,4	0,22	0,43

Результаты расчета сводятся в табл. 1.2.

Таблица 1.2

### Результат расчета потенциометрического датчика

$L$ , мм	$n$ , вит.	$\tau$ , мм	$d_{II}$ , мм	$\beta$	$R$ , Ом	$H$ , мм

### 1.3. Принцип работы и виды термоэлектрических датчиков

Термоэлектрический преобразователь (*термопара*) – устройство, применяемое для измерения температуры в промышленности, научных исследованиях, медицине, в системах автоматики. Основное назначение

термопар – измерение температуры. Температура – физическая величина, количественно характеризующая меру средней кинетической энергии теплового движения молекул какого-либо тела или вещества. Из анализа определения температуры можно сделать вывод, что данная физическая величина не может быть измерена непосредственно. Судить об изменении температуры какого-либо объекта можно по изменению других физических свойств данного объекта (например, объема, давления, электрического сопротивления, термоэдс, интенсивности излучения и др.).

Принцип действия термопары (рис. 1.2) основан на термоэлектрическом эффекте, или эффекте Зеебека. К достоинствам термопар как средств измерения температуры можно отнести высокую точность измерения значений температуры, большой температурный диапазон измерения, их простоту устройства и надежность.

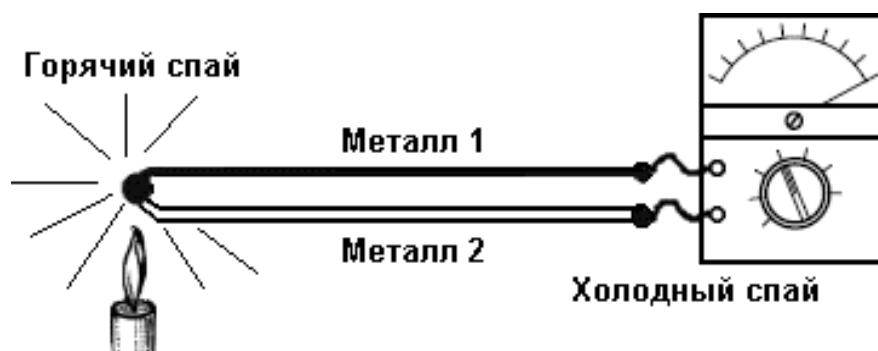


Рис. 1.2. Принцип работы термопары

Термоэлектрический датчик представляет собой цепь, состоящую из двух разнородных металлов. Проводники называются термоэлектродами, стыки – спаями, а возникающая при нагреве спая эдс – термоэдс. Спай, температура которого поддерживается постоянной, называется холодным, а спай, соприкасающийся с измеряемой средой, – горячим. По величине термоэдс можно судить о разности температур горячего и холодного спаев, и если известна температура холодного спая, то можно определить температуру горячего спая.

В зависимости от диапазона измеряемых температур различают две основные группы методов измерения: контактные (собственно термометрия) и бесконтактные (пирометрия или термометрия излучения). Бесконтактные способы применяются, как правило, для измерения очень высоких температур. Измерение температуры с помощью термопар относится к контактному способу измерения.

Термопары классифицируются по материалам, из которых они изготовлены, а также по классу точности (допуска).



## **Классификация типов термопар по конструктивному исполнению**

По назначению и условиям эксплуатации:

- погружаемые;
- поверхностные.

По наличию и материалу защитного чехла:

- изготавливаемые без чехла;
- со стальным чехлом (до  $t \approx 600$  °С);
- с чехлом из специального жаростойкого сплава (до  $t \approx 1000$ – $1100$  °С);
- с фарфоровым чехлом (до  $t \approx 1300$  °С);
- с чехлом из тугоплавких сплавов ( $t \approx 2000$  °С и более).

По конструкции крепления термопары на месте установки:

- с неподвижным штуцером;
- с подвижным штуцером;
- с подвижным фланцем.

По защищенности от внешней среды со стороны выводов:

- с обыкновенной головкой;
- с водозащищенной головкой;
- со специальной заделкой выводных концов (без головки).

По защищенности от измеряемой среды:

- защищенные от воздействия неагрессивных и агрессивных сред;
- незащищенные (применяются, когда измеряемая среда не оказывает вредного влияния на термоэлектроды).

По герметичности, рассчитанные на высокое давление измеряемой среды:

- негерметичные;
- герметичные, предназначенные для работы при различных условных давлениях и температурах.

По устойчивости к механическим воздействиям:

- вибротрясоустойчивые;
- ударопрочные;
- обыкновенные.

По числу зон, в которых должна контролироваться температура:

- однозонные;
- многозонные.

По степени тепловой инерции:

- с большой инерционностью – до 3,5 минут;
- со средней инерционностью – до 1 минуты;
- малоинерционные – до 40 секунд;
- с ненормированной инерционностью.

#### Основные преимущества термопар:

- широкий диапазон рабочих температур, это самый высокотемпературный из контактных датчиков;
- спай термопары может быть непосредственно заземлен или приведен в прямой контакт с измеряемым объектом;
- простота изготовления;
- надежность и прочность конструкции.

#### К недостаткам термопар относятся:

- необходимость контроля температуры холодных спаев;
- возникновение термоэлектрической неоднородности в проводниках и, как следствие, изменение градуировочной характеристики из-за изменения состава сплава в результате коррозии и других химических процессов;
- материал электродов не является химически инертным и при недостаточной герметичности корпуса термопары может подвергаться влиянию агрессивных сред, атмосферы и т.д.;
- на большой длине термопарных и удлинительных проводов может возникать эффект «антенны» для существующих электромагнитных полей;
- зависимость термоэдс от температуры существенно не линейна (это создает трудности при разработке вторичных преобразователей сигнала).

### 1.4. Расчет параметров термоэлектрического датчика

Величина термоэдс, мВ,

$$E_{ТП} = \frac{U_M (R_M + R_{BH})}{R_M},$$

где  $U_M$  – магнитное напряжение;  $R_M$  – магнитное сопротивление;  $R_{BH}$  – внутреннее сопротивление.

Перепад температуры, °С,

$$t_{ПЕР} = \frac{E_{ТП} \cdot 100}{E_{ТАБ}}.$$

где  $E_{ТАБ}$  – термоэдс, определяемая по градуировочным таблицам.

Температура горячего конца термопары, град.,

$$t_1 = t_{ПЕР} + t_0,$$

где  $t_0$  – температура холодного конца термопары.

При точном расчете термоэдс вводится поправка на температуру холодного конца термопары, мВ:

$$E_{П} = \frac{E_{ТАБ} \cdot t_0}{100}.$$

Расчетная термоэдс, мВ,

$$E_P = E_{ТП} + E_{II}.$$

Исходные данные для расчета взять из табл. 1.3 согласно варианту. Номер варианта определяется по предпоследней цифре шифра зачетной книжки студента.

Таблица 1.3

**Исходные данные для расчета термоэлектрического датчика**

№ варианта	$R_M$ , Ом	$R_{BH}$ , Ом	$t$ , °С	$U_M$ , мВ	$E_{ТАБ}$ , мВ
0	110	9	15	24	6,95
1	120	10	5	24	6,95
2	130	10	10	24	6,95
3	140	9	15	24	6,95
4	150	8	20	24	6,95
5	160	10	25	24	6,95
6	170	7	30	24	6,95
7	180	15	35	24	6,95
8	190	20	40	24	6,95
9	200	25	45	24	6,95

Результаты расчета сводятся в табл. 1.4.

Таблица 1.4

**Результат расчета термоэлектрического датчика**

$E_{ТП}$ , В	$t_{ПЕР}$ , град.	$t_1$ , °С	$E_{II}$ , В	$E_P$ , В

**1.5. Пример расчета параметров потенциометрического и термоэлектрического датчиков**

*Исходные данные для расчета потенциометрического датчика:*

номинальное сопротивление  $R_H = 4400$  Ом;

максимальная погрешность  $\delta_{max} = 2,5$  %;

напряжение на входе  $U = 26$  В;

средний диаметр каркаса  $D = 45$  мм;

угол поворота  $\alpha = 330$  град.;

толщина каркаса  $b = 2$  мм;

разрешающая способность  $\delta_p = 0,25 \%$ ;

удельное сопротивление  $\rho = 0,49 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{ м}$ .

Расчет параметров:

1) рабочая длина каркаса  $L = 330 \cdot 45 \cdot 3,14 / 360 = 129,5 \text{ мм}$ ;

2) минимальное число витков  $n = 100 / 0,25 = 400 \text{ вит.}$ ;

3) шаг намотки  $\tau = 129,5 / 400 = 0,324 \text{ мм}$ ;

4) диаметр провода с изоляцией  $d_{II} = 0,324 - 0,015 = 0,309 \text{ мм}$  (с учетом изоляции); выбираем  $d \approx 0,3 \text{ (мм)} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;

5) коэффициент нагрузки  $\beta = (1 - 0,025) / (4 \cdot 0,025) = 9,75$ ;

6) сопротивление потенциометра  $R = 4400 / 9,75 = 451,3 \text{ Ом}$ ;

7) высота каркаса  $H = \frac{3,14 \cdot 451,3 \cdot (0,3 \cdot 10^{-3})^2}{8 \cdot 0,49 \cdot 10^{-6} \cdot 400} - 0,002 = 0,0793 \text{ м} = 79,3 \text{ мм}$ .

*Исходные данные для расчета термоэлектрического датчика:*

$R_M = 130 \text{ Ом}$ ;

$R_{BH} = 10 \text{ Ом}$ ;

$t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

$U_M = 24 \text{ мВ}$ ;

$E_{ТАБ} = 6,95 \text{ мВ}$ .

Расчет параметров:

1) термоэдс  $E_{ТII} = 24(130 + 10)/130 = 26 \text{ мВ}$ ;

2) перепад температуры  $t_{ПЕР} = 26 \cdot 100/6,95 = 374 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

3) температура горячего спая  $t_1 = 374 + 15 = 389 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

4) термоэдс с поправкой на температуру холодного конца термопары  $E_{II} = 6,95 \cdot 15/100 = 1,04 \text{ мВ}$ ;

5) расчетная термоэдс  $E_p = 26 + 1,04 = 27,04 \text{ мВ}$ .

### **Контрольные вопросы для самопроверки**

1. Как делятся потенциметрические датчики в зависимости от способа выполнения сопротивления?

2. Перечислите преимущества и недостатки потенциметрических датчиков.

3. Приведите реверсивную схему потенциметрического датчика.

4. Каковы основные причины погрешностей, из-за которых идеальные характеристики потенциометрических датчиков отличаются от реальных?
5. Каков принцип построения многооборотных потенциометров и где они применяются?
6. Что такое фотопотенциометры? На какие два типа они делятся по назначению?
7. Функциональные потенциометрические датчики: построение, применение, особенности.
8. На чем основан принцип работы термоэлектрического датчика?
9. Назовите недостатки термоэлектрических датчиков по сравнению с другими типами датчиков для измерения температур.
10. Из каких материалов изготавливают термоэлектрические датчики?
11. Назовите преимущества термоэлектрических датчиков по сравнению с другими датчиками измерения температур.
12. От чего зависит ЭДС термоэлектрического датчика?
13. Какие схемы включения термоэлектрического датчика существуют?
14. Укажите области применения термоэлектрического датчика.

## **2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКТИВНОГО ДАТЧИКА**

### **2.1. Принцип работы индуктивных датчиков**

Индуктивный датчик – это преобразователь параметрического типа, принцип действия которого основан на изменении индуктивности или взаимной индуктивности обмотки с сердечником вследствие изменения магнитного сопротивления магнитной цепи датчика, в которую входит сердечник.

Широкое применение индуктивные датчики находят в промышленности для измерения перемещений и покрывают диапазон от 1 мкм до 20 мм. Также можно использовать индуктивный датчик для измерения давлений, сил, уровней расхода газа и жидкости и т.д. В этом случае измеряемый параметр с помощью различных чувствительных элементов преобразуется в изменение перемещения, затем эта величина подводится к индуктивному измерительному преобразователю.

Индуктивный датчик является дискретным. Сигнал на его выходе появляется, когда в заданной зоне присутствует металл. В основе работы датчика приближения лежит генератор с катушкой индуктивности. Когда в электромагнитном поле катушки появляется металл, это поле резко

меняется, что влияет на работу схемы. И схема, содержащая компаратор, выдаёт сигнал на ключевой транзистор или реле. При отсутствии металла в зоне чувствительности датчика сигнал отсутствует (рис. 2.1).

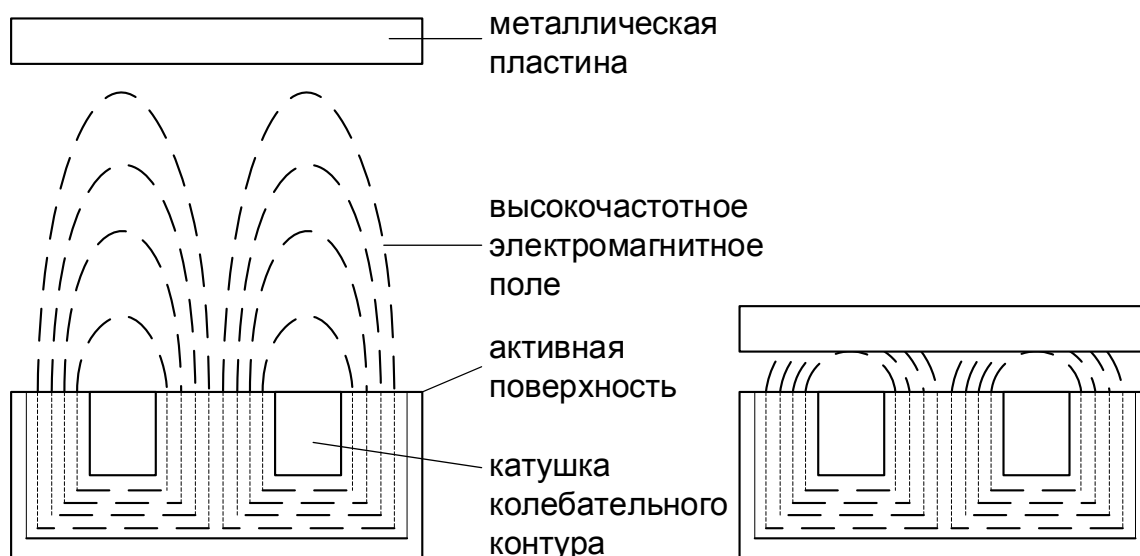


Рис. 2.1. Физический принцип работы индуктивных датчиков

По схеме построения индуктивные датчики можно разделить на одинарные и дифференциальные. Одинарный индуктивный датчик содержит одну измерительную ветвь, дифференциальный – две.

В дифференциальном индуктивном датчике при изменении измеряемого параметра одновременно изменяются индуктивности двух одинаковых катушек, причем изменение происходит на одну и ту же величину, но с обратным знаком. Для дифференциальных индуктивных датчиков необходимы два отдельных источника питания, для чего обычно используется разделительный трансформатор.

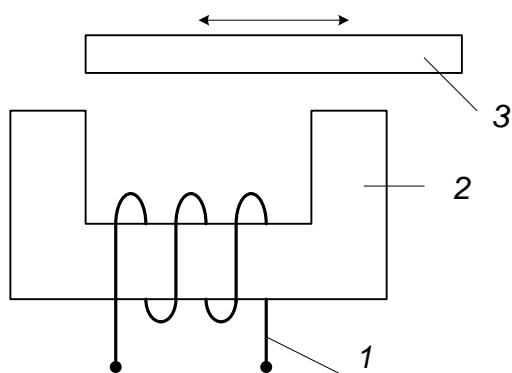


Рис. 2.2. Принцип построения индуктивных датчиков линейных перемещений: 1 – катушка индуктивности; 2 – сердечник; 3 – якорь

Структура индуктивного датчика линейного перемещения представлена на рис. 2.2. При перемещении якоря изменяется длина воздушного зазора, что приводит к изменению индуктивности и, как следствие, полного сопротивления, которое, в свою очередь, влияет на ток в обмотке. По току в обмотке можно судить о величине смещения якоря.

В работе индуктивных датчиков производится ряд преобразований:

$$F \rightarrow \delta_B \rightarrow R_M \rightarrow L \rightarrow X_L \rightarrow Z \rightarrow I,$$

где  $F$  – усилие;  $\delta_B$  – длина воздушного зазора;  $R_M$  – магнитное сопротивление;  $L$  – индуктивность;  $X_L$  – индуктивное сопротивление;  $Z$  – полное сопротивление;  $I$  – ток.

Существует несколько типов индуктивных датчиков перемещения:

1) несвязанные преобразователи, которые имеют якорь, отделенный от тела корпуса. Части датчика должны быть установлены таким образом, чтобы якорь не прикасался к внутренней трубке корпуса. В этом случае можно получить абсолютное отсутствие трения при движении чувствительного элемента датчика;

2) монолитные преобразователи, которые имеют тефлоновый подшипник, который направляет якорь (шток) по внутренней трубке;

3) монолитные преобразователи с возвратной пружиной, которая толкает якорь (шток) наружу.

Информативная способность индуктивного датчика определяется его погрешностью преобразования измеряемого параметра. Суммарная погрешность индуктивного датчика складывается из большого числа составляющих погрешностей, основные из которых: погрешность от нелинейности характеристики, температурная погрешность, погрешность от влияния внешних электромагнитных полей, погрешность от магнитоупругого эффекта, погрешность от тензометрического эффекта обмотки, погрешность от соединительного кабеля, конструктивные погрешности, технологические погрешности, погрешность от старения датчика. В большинстве случаев выраженные процессы изменения электромагнитных характеристик заканчиваются в течение первых 200 часов после термообработки и размагничивания магнитопровода. В дальнейшем они остаются практически постоянными и не играют существенной роли в общей погрешности индуктивного датчика.

*Достоинства индуктивных датчиков:*

- простота и прочность конструкции, отсутствие скользящих контактов;
- возможность подключения к источникам промышленной частоты;
- относительно большая выходная мощность (до десятков ватт);
- значительная чувствительность.

*Недостатки индуктивных датчиков:*

- точность работы зависит от стабильности питающего напряжения по частоте;
- возможна работа только на переменном токе.

## 2.2. Расчет индуктивности датчика

Расчет датчика состоит в определении индуктивности заданного датчика при различных величинах воздушного зазора.

Индуктивность датчика, Гн,

$$L = \frac{2}{\delta_B} \cdot \pi \cdot n^2 \cdot S_M \cdot 10^{-7},$$

где  $\delta_B$  – длина воздушного зазора, м;  $n$  – число витков;  $S_M$  – площадь поперечного сечения магнитопровода.

После изучения теоретического материала (назначение, физический принцип действия, применение и особенности датчика) необходимо произвести расчет индуктивности датчика в зависимости от длины воздушного зазора. Исходные данные для расчета взять из табл. 2.1 согласно варианту. Номер варианта определяется по последней цифре шифра зачетной книжки студента.

Таблица 2.1

**Исходные данные для расчета индуктивности датчика**

№ варианта	$\delta_{B1}$ , мм	$\delta_{B2}$ , мм	$\delta_{B3}$ , мм	$S_M$ , мм <sup>2</sup>	$N$
0	0,1	0,3	0,5	20	15 000
1	0,3	0,5	0,7	40	16 000
2	0,4	0,6	0,8	50	16 000
3	0,3	0,5	0,7	60	15 500
4	0,4	0,6	0,8	30	16 500
5	0,5	0,7	0,9	30	16 500
6	0,2	0,4	0,6	50	15 500
7	0,8	1,0	1,2	50	17 000
8	0,6	0,8	1,0	40	17 000
9	0,7	0,9	1,1	30	17 500

Результаты расчета сводятся в табл. 2.2.

Таблица 2.2

**Результат расчета индуктивности датчика**

$L_1$ , Гн	$L_2$ , Гн	$L_3$ , Гн

По рассчитанным данным необходимо построить график зависимости  $L = f(\delta_B)$ . По полученному графику сделать выводы.

**2.3. Определение параметров обмотки индуктивного датчика**

При расчете параметров обмотки индуктивного датчика производится расчет количества витков в обмотке, диаметра провода обмотки, индуктивности датчика и угловой частоты переменного тока.

Угловая частота переменного тока, 1/с,

$$\omega = 2\pi f ,$$

где  $f$  – частота.



Индуктивность датчика, Гн,

$$L = \frac{U_{\sim}}{\omega \cdot I_{\sim}},$$

где  $U_{\sim}$  – переменное напряжение;  $I_{\sim}$  – переменный ток;  $\omega$  – угловая частота.

Число витков

$$n = \sqrt{\frac{L \delta_B \cdot 10^7}{2\pi S_M}},$$

где  $S_M$  – площадь поперечного сечения магнитопровода;  $\delta_B$  – длина воздушного зазора.

Диаметр провода, мм,

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot I_{\sim}}{\pi \cdot \Delta_{ДОП}}},$$

где  $\Delta_{ДОП}$  – допустимая плотность тока.

Исходные данные для расчета взять из табл. 2.3 согласно варианту, номер варианта определяется по предпоследней цифре шифра зачетной книжки студента.

Таблица 2.3

### Исходные данные для расчета обмотки индуктивного датчика

№ варианта	$S_M$ , мм <sup>2</sup>	$\delta_B$ , мм	$I$ , мА	$\Delta_{ДОП}$ , А/мм	$U$ , В	$f$ , Гц
0	500	3	15	4	220	400
1	300	3	20	4	220	400
2	400	3	25	3,5	220	400
3	550	7	10	3,5	220	400
4	550	7	10	4	220	400
5	450	7	15	4	220	400
6	350	9	20	3,5	220	400
7	300	9	25	4,5	220	400
8	420	9	30	4	220	400
9	520	5	35	3,5	220	400

Результаты расчета сводятся в табл. 2.4.

Таблица 2.4

### Результат расчета обмотки индуктивного датчика

$\omega$ , 1/с	$L$ , Гн	$n$ , ВИТ.	$d$ , мм

## 2.4. Пример расчета параметров индуктивных датчиков

*Исходные данные для расчета индуктивности датчика:*

длина воздушного зазора 1:  $\delta_{B1} = 0,4 \text{ мм} = 0,0004 \text{ м} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ ;

длина воздушного зазора 2:  $\delta_{B2} = 0,6 \text{ мм} = 0,0006 \text{ м} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ ;

длина воздушного зазора 3:  $\delta_{B3} = 0,8 \text{ мм} = 0,0008 \text{ м} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ ;

площадь поперечного сечения магнитопровода  $S_M = 40 \text{ мм}^2 = 0,00004 \text{ м}^2 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ ;

число витков  $n = 16 \text{ 000}$  вит.

Расчет параметров:

индуктивность датчика (при  $\delta_{B1}$ )  $L_1 = (2/0,0004) \cdot 3,14 \cdot 16 \text{ 000}^2 \times 0,00004 \cdot 10^{-7} = 16,1 \text{ Гн}$ ;

индуктивность датчика (при  $\delta_{B2}$ )  $L_2 = (2/0,0006) \cdot 3,14 \cdot 16 \text{ 000}^2 \times 0,00004 \cdot 10^{-7} = 10,7 \text{ Гн}$ ;

индуктивность датчика (при  $\delta_{B3}$ )  $L_3 = (2/0,0008) \cdot 3,14 \cdot 16 \text{ 000}^2 \times 0,00004 \cdot 10^{-7} = 8 \text{ Гн}$ .

По полученным значениям индуктивности строится график  $L = f(\delta_B)$  (рис. 2.3).

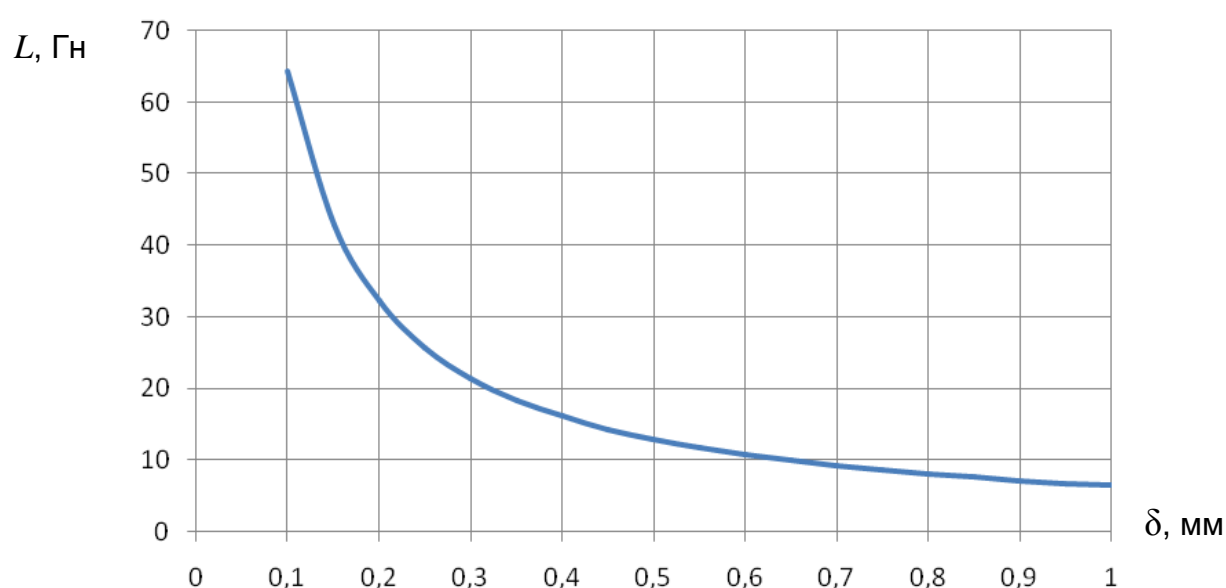


Рис. 2.3. График индуктивности датчика

*Исходные данные для расчета параметров обмотки индуктивного датчика:*

площадь поперечного сечения магнитопровода  $S_M = 200 \text{ мм}^2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ;

длина воздушного зазора  $\delta_B = 2 \text{ мм} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ;

переменный ток  $I = 10 \text{ мА} = 0,01 \text{ А}$ ;

допустимая плотность тока  $\Delta_{ДОП} = 3 \text{ А/мм}$ ;  
переменное напряжение  $U = 220 \text{ В}$ ;  
частота  $f = 400 \text{ Гц}$ .

Расчет параметров:

1) угловая частота переменного тока  $\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 400 = 2512 \text{ (1/с)}$ ;

2) индуктивность  $L = 220 / (0,01 \cdot 2512) = 8,75 \text{ Гн}$ ;

3) число витков  $n = \sqrt{\frac{8,75 \cdot 0,2 \cdot 0,01 \cdot 10^7}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0002}} = 11 \text{ 800 вит.}$ ;

4) диаметр провода:  $d = \sqrt{4 \cdot 0,01 / (3,14 \cdot 3)} = 0,065 \text{ мм}$ .

### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Каков физический принцип работы индуктивных датчиков?
2. Каковы достоинства и недостатки индуктивных датчиков?
3. В чем состоит основное отличие индуктивных датчиков от емкостных?
4. Опишите особенности применения индуктивных датчиков в устройствах автоматизации и управления.
5. Какова последовательность преобразования механического перемещения в электрический сигнал у индуктивного датчика?
6. Приведите основные узлы электрической схемы индуктивного датчика приближения.
7. Перечислите виды индуктивных датчиков.
8. Как можно получить дифференциальный индуктивный датчик?

## 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКОВ

### 3.1. Принцип работы пьезоэлектрических датчиков

Работа пьезоэлектрического датчика основана на физическом явлении, которое называется пьезоэлектрическим эффектом. Суть пьезоэлектрического эффекта (пьезоэффекта) заключается в том, что при сжатии или растяжении некоторых кристаллов на их гранях появляется электрический заряд, величина которого пропорциональна действующей силе.

Пьезоэффект обратим, т.е. приложенное электрическое напряжение вызывает деформацию пьезоэлектрического образца – сжатие или растяжение его соответственно знаку приложенного напряжения. Это явление,

называемое обратным пьезоэффектом, используется для возбуждения и приема акустических колебаний звуковой и ультразвуковой частоты.

Пьезокристаллический элемент может быть любой формы: прямоугольным бруском, плоской пластиной, круглой шайбой, трубчатым цилиндром, что определяется конструкцией опоры и местом приложения внешнего усилия к пьезоэлементу.

Пьезоэлектрические датчики относятся к генераторному типу. Широко известны пьезоэлектрические звукосниматели: игла звукоснимателя воспринимает все изменения глубины звуковой дорожки и передает их на пьезокристалл. Выходное напряжение с пьезокристалла усиливается, и через динамик мы слышим записанные звуки. Появление зарядов на гранях в зависимости от сжатия называется прямым пьезоэффектом.

Существует и обратный пьезоэффект: при подаче напряжения на грани кристалла изменяются его размеры (он сжимается или разжимается). Обратный пьезоэффект нашел применение в ультразвуковых генераторах. А основанные на прямом пьезоэффекте пьезоэлектрические датчики используются в автоматике для измерения давлений, вибраций, ускорений, других параметров быстропротекающих процессов.

*К достоинствам пьезоэлектрического датчика* можно отнести его дешевизну, простоту как в изготовлении, так и в использовании (для измерений нужен только пьезодатчик и вольтметр, нет необходимости в дополнительных источниках энергии). Еще одним достоинством пьезоэлектрического датчика является то, что измерение воздействий на него со всех сторон может производиться одновременно и в одной точке. Это дает возможность делать гораздо более точные и надежные трехкоординатные датчики виброускорений и т.п.

*К недостаткам датчика* можно отнести то, что в ряде случаев необходимо учитывать влияние в таких датчиках обратного пьезоэффекта. Таким образом, подача электрического напряжения на пьезодатчик приводит к его расширению либо сжатию, т.е. датчик превращается в простейший вариант двигателя.

### **3.2. Расчет параметров пьезоэлектрического датчика**

Расчет сводится к определению следующих электрических параметров для определенного типа датчика: величины заряда, емкости пластины датчика, напряжения между обкладками и чувствительности датчика.

Величина заряда,  $Q$ ,

$$q_X = K_0 F_X, \quad (3.1)$$

где  $K_0$  – пьезоэлектрическая постоянная (модуль);  $F_X$  – усилие, направленное вдоль электрической оси.

Емкость одной пластины, пФ,

$$C_0 = 0,89 \frac{\varepsilon_r S_X}{d} = 0,89 \frac{\varepsilon_r \pi D^2}{4d} = 0,89 \frac{\varepsilon_r \pi ab}{4d},$$

где  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $D$  – диаметр пластины (диска);  $a$  и  $b$  – стороны пластины (прямоугольника);  $d$  – толщина пластины.

Напряжение между обкладками, пФ,

$$U = \frac{n \cdot q_X \cdot 10^{12}}{C_{BX} + nC_0} = \frac{q_X \cdot 10^{12}}{\frac{C_{BX}}{n} + C_0},$$

где  $C_{BX}$  – емкость измеряемой цепи;  $n$  – количество пластин.

Чувствительность датчика, В/Н,

$$S_D = \frac{U}{F_X}.$$

Необходимо определить параметры пьезоэлектрического датчика, выполненного в виде прямоугольника (диска) со сторонами  $a$  и  $b$  (диаметр  $D$ ), толщиной  $d$ , с параллельно соединенными пластинами в количестве  $n$  штук.

Исходные данные для расчета взять из табл. 3.1 согласно варианту. Номер варианта определяется по последней цифре шифра зачетной книжки студента.

Таблица 3.1

### Исходные данные для расчета пьезоэлектрического датчика

№ варианта	Материал	$\varepsilon_r \cdot 10^{-11}$	$K_0 \cdot 10^{-12}$ , К/Н	$a \cdot b$ , см <sup>2</sup> ; $D$ , см	$d$ , мм	$F_X$ , Н	$C_{BX}$ , пФ	$n$ , шт.
0	Кварц	4,5	2,7	$2 \times 1$	1	15	13,1	1
1	Кварц	4,5	2,7	$D = 1$	3	20	16,8	1
2	Кварц	4,5	2,7	$1 \times 1$	2	30	20	2
3	Сегн. соль	205	150	$2 \times 1$	1	30	20	1
4	Сегн. соль	205	150	$D = 1$	2	20	13,1	2
5	Сегн. соль	205	150	$1 \times 1$	3	15	16,8	2
6	Сегн. соль	205	150	$2 \times 2$	4	25	52	1
7	Тит. бария	1500	100	$2 \times 1$	1	15	13,1	2
8	Тит. бария	1500	100	$1 \times 1$	2	40	16,8	2
9	Тит. бария	1500	100	$D = 1$	1	20	52	1

Результаты расчета сводятся в табл. 3.2.

Таблица 3.2

### Результат расчета пьезоэлектрического датчика

$q_x$ , К/Н	$C_0$ , пФ	$U$ , В	$S_d$ , В/Н

### 3.3. Принцип работы и построения емкостных датчиков

Емкостным датчиком называют преобразователь параметрического типа, в котором изменение измеряемой величины преобразуется в изменение емкостного сопротивления.

Область применения емкостных датчиков достаточно широка. Они используются в системах регулирования и управления производственными процессами почти во всех отраслях промышленности. Емкостные датчики применяются для контроля заполнения резервуаров жидким, порошкообразным или зернистым веществом, как конечные выключатели на автоматизированных линиях, конвейерах, роботах, обрабатывающих центрах, станках, в системах сигнализации, для позиционирования различных механизмов и т.д.

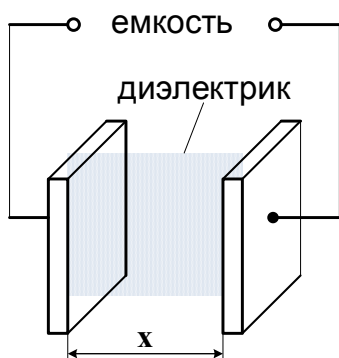


Рис. 3.1. Схема простейшего емкостного преобразователя

Емкостные преобразующие элементы превращают изменение измеряемой величины в изменение емкости. Конденсатор формируется из двух пластин, разделенных слоем диэлектрика (рис. 3.1). Пластины могут иметь различную геометрическую форму.

При построении емкостных датчиков в качестве изменяемого параметра можно использовать изменение площади пластин (датчики угла на основе конденсатора переменной емкости), расстояния между пластинами  $X$  (датчики перемещения) и диэлектрической проницаемости среды (датчики уровня, влажности и т.д.).

Емкостные датчики линейных и угловых перемещений являются наиболее распространенными приборами, широко используемыми в машиностроении и на транспорте, строительстве и энергетике, в различных измерительных комплексах.

Обычно емкостный датчик представляет собой плоский или цилиндрический конденсатор, одна из обкладок которого испытывает подвергаемое контролю перемещение, вызывая изменение емкости. Работа датчиков заключается в преобразовании измеряемой величины в емкостное сопротивление. Принцип действия емкостных датчиков основан на зависимости емкости конденсатора от размеров обкладок, расстояния между ними, диэлектрической проницаемости среды между обкладками.

Емкостные преобразователи могут быть использованы при измерении различных величин по трем направлениям, в зависимости от функциональной связи измеряемой неэлектрической величины со следующими параметрами:

- переменной диэлектрической проницаемостью среды  $\epsilon$ ;
- площадью перекрытия обкладок  $S$ ;
- изменяющимся расстоянием между обкладками  $d$ .

По способу исполнения все емкостные измерительные преобразователи можно разделить на одноемкостные и двухъемкостные датчики.

Одноемкостный датчик прост по конструкции и представляет собой один конденсатор с переменной емкостью. К его минусам относится значительное влияние внешних факторов, таких как влажность и температура. Для компенсации указанных погрешностей применяют дифференциальные конструкции.

При использовании двухъемкостных датчиков измерительное устройство может вообще не содержать образцовых мер емкости, что способствует повышению точности измерения.

### ***Классификация емкостных датчиков по измеряемым параметрам***

**1. Датчики линейных и угловых перемещений.** Большую часть неэлектрических величин, подлежащих измерению, составляют линейные и угловые перемещения. На основе конденсатора созданы конструкции емкостных датчиков перемещения двух основных типов: с переменной площадью электродов; с переменным зазором между электродами. Первые более удобны для измерения больших перемещений (единицы, десятки и сотни миллиметров), а вторые – для измерения малых и сверхмалых перемещений (доли миллиметра, микрометры и менее).

**2. Инклинометр (датчик крена)** представляет собой дифференциальный емкостной преобразователь наклона, включающий в себя чувствительный элемент в форме капсулы. Выходной сигнал датчика пропорционален величине емкости дифференциального конденсатора, которая линейно зависит от положения корпуса в вертикальной плоскости. Для определения положения плоскости в пространстве используется два расположенных под углом  $90^\circ$  друг к другу инклинометра.

**3. Емкостные датчики уровня жидкости.** Емкостный преобразователь для измерения уровня непроводящей жидкости представляет собой два параллельно соединенных конденсатора.

**4. Датчики давления.** Одной из основных конструкций емкостного преобразователя давления является одностаторная, которая применяется для измерения абсолютного давления. Такой датчик состоит из металлической ячейки, разделенной на две части туго натянутой плоской металлической диафрагмой, с одной стороны которой расположен не-

подвижный изолированный от корпуса электрод. Электрод с диафрагмой образуют переменную емкость, которая включена в измерительную схему. Когда давление по обеим сторонам диафрагмы одинаково, датчик сбалансирован. Изменение давления в одной из камер деформирует диафрагму и изменяет емкость, что фиксируется измерительной схемой.

Емкостные датчики обладают целым рядом преимуществ по сравнению с датчиками других типов. *К их достоинствам относятся:*

- простота изготовления, использование недорогих материалов для производства;
- малые габариты и вес;
- низкое потребление энергии;
- высокая чувствительность;
- отсутствие контактов (в некоторых случаях – один токосъем);
- долгий срок эксплуатации;
- потребность весьма малых усилий для перемещения подвижной части емкостного датчика;
- простота приспособления формы датчика к различным задачам и конструкциям.

*К недостаткам емкостных датчиков следует отнести:* сравнительно небольшой коэффициент передачи; высокие требования к экранировке деталей; необходимость работы на повышенной частоте.

### 3.4. Расчет основных параметров емкостного датчика угловых перемещений

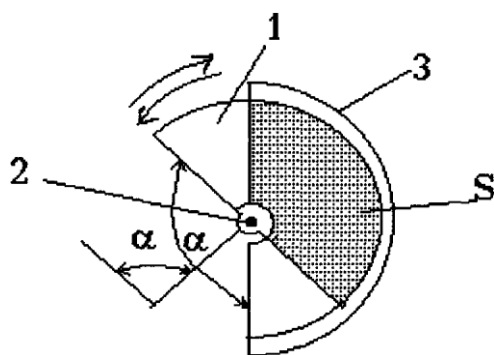


Рис. 3.2. Схема емкостного датчика угловых перемещений: 1 – подвижная пластина; 2 – вал; 3 – неподвижная пластина

В таких датчиках один из электродов конденсатора крепится к валу объекта и при вращении смещается относительно неподвижного, меняя площадь перекрытия пластин конденсатора. Это, в свою очередь, вызывает изменение емкости, что фиксируется измерительной схемой.



Максимальная емкость датчика при  $\alpha = 180, \Phi$ ,

$$C_{\max} = \frac{0,89e_r S_{\max} (n-1) \cdot 180}{d \cdot 180} = \frac{0,89S_{\max} (n-1)}{d},$$

где  $S_{\max}$  – площадь взаимодействия между подвижной и одной из неподвижных пластин;  $d$  – расстояние между пластинами;  $e_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $e_r = 1$  (диэлектрик–воздух).

Общее количество подвижных и неподвижных пластин, шт.,

$$n = \frac{C_{\max} \cdot d}{0,89S_{\max} + 1},$$

полученное количество округляется до целого числа.

Чувствительность датчика

$$S_{\mathcal{D}} = \frac{0,89S_{\max} (n-1)}{d \cdot 180}.$$

Необходимо определить основные параметры емкостного датчика. Исходные данные для расчета взять из табл. 3.3 согласно варианту. Номер варианта определяется по предпоследней цифре шифра зачетной книжки студента.

Таблица 3.3

### Исходные данные для расчета емкостного датчика

№ варианта	$S_{\max}, \text{см}^2$	$C_{\max}, \text{пФ}$	$d, \text{мм}$
0	10	250	0,4
1	12	400	0,5
2	10	200	0,6
3	15	600	0,4
4	18	830	0,8
5	15	440	0,6
6	14	500	0,8
7	15	550	0,7
8	16	600	0,5
9	18	800	0,9

Результаты расчета сводятся в табл. 3.4.

Таблица 3.4

### Результат расчета емкостного датчика

$n, \text{шт.}$	$S_{\mathcal{D}}$

### 3.5. Пример расчета параметров пьезоэлектрического и емкостного датчиков

*Исходные данные для расчета параметров пьезоэлектрического датчика:*

материал датчика – кварц;

относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r = 4,5 \cdot 10^{-11}$ ;

пьезоэлектрическая постоянная (модуль):  $K_0 = 2,5 \cdot 10^{-12}$  К/Н;

количество пластин  $n = 1$ ;

диаметр пластины  $D = 1$  см =  $1 \cdot 10^{-2}$  м;

толщина пластины  $d = 1$  мм =  $1 \cdot 10^{-3}$  м;

усилие, направленное вдоль электрической оси,  $F_X = 15$  Н;

емкость измеряемой цепи  $C_{BX} = 17$  пФ.

Расчет параметров:

1) величина заряда  $q_X = 2,5 \cdot 10^{-12} \cdot 15 = 37,5 \cdot 10^{-12}$  (К);

2) емкость одной пластины  $C_0 = 0,89 \cdot (4,5 \cdot 10^{-11} \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}) / (4 \cdot 10^{-3}) = 3,1$  пФ;

3) напряжение между обкладками  $U = (37,5 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{12}) / (17/1 + 3,1) = 1,9$  В;

4) чувствительность датчика:  $S_D = 1,9/15 = 0,12$  В/Н.

*Исходные данные для расчета параметров емкостного датчика угловых перемещений:*

площадь взаимодействия между подвижной и одной из неподвижных пластин  $S_{\max} = 15$  см<sup>2</sup>;

максимальная емкость датчика  $C_{\max} = 400$ ;

расстояние между пластинами  $d = 0,8$ ;

диэлектрическая проницаемость среды (диэлектрик–воздух)  $\epsilon_r = 1$ .

Расчет параметров:

1) общее количество подвижных и неподвижных пластин  $n = \frac{400 \cdot 0,8}{0,89 \cdot 15 + 1} = 22$  шт.;

2) чувствительность датчика  $S_D = \frac{0,89 \cdot 15 \cdot (22 - 1)}{0,8 \cdot 180} = 2$ .

#### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Что представляют собой ёмкостные датчики?
2. Каковы области применения емкостных датчиков?
3. Назовите виды емкостных датчиков (в зависимости от измеряемых параметров).
4. Что такое емкостные инклинометры и как они работают?
5. Перечислите преимущества и недостатки емкостных датчиков.

6. Перечислите типы емкостных преобразователей и укажите их конструктивные особенности.

7. Где находят применение датчики, основанные на прямом и обратном пьезоэффектах?

8. В чем состоит суть пьезоэффекта?

9. Какие материалы используются для пьезоэлектрических датчиков?

10. Перечислите достоинства и недостатки пьезоэлектрических датчиков.

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РЕЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

##### 4.1. Принцип построения и работы электромагнитного реле

Реле – это устройство, которое автоматически осуществляет скачкообразное переключение выходного сигнала под воздействием управляющего сигнала, изменяющегося непрерывно в определенных пределах. Электромагнитные реле по роду используемого тока делятся на реле постоянного и переменного тока. Реле постоянного тока делятся на нейтральные и поляризованные.

Реле (рис. 4.1) состоит из сердечника 1, якоря 2 и основания 3. На сердечнике размещена катушка 4 с обмоткой 5. Обмотка реле выполняет функции управляющей части реле. На основании реле размещается контактная система, представляющая собой исполнительную часть реле. Контактная система состоит из контактных пружин 6, контактов 7 и колодки 8.

Контакты изготавливаются из материала, обладающего высокой электропроводностью, достаточной механической прочностью, устойчивостью против коррозии и электрической эрозии.

В исходном состоянии реле, когда по обмотке не протекает ток, на якорь воздействует возвращающая пружина и контактные пружины 6, благодаря этому между сердечником 1 и якорем 2 имеется воздушный зазор  $\delta$ .

При пропускании тока по обмотке возникает магнитный поток, представляющий собой сумму полезного потока  $\Phi_i$  и потока рассеивания  $\Phi_s$ . На якорь реле воздействует тяговое усилие, и якорь притягивается к

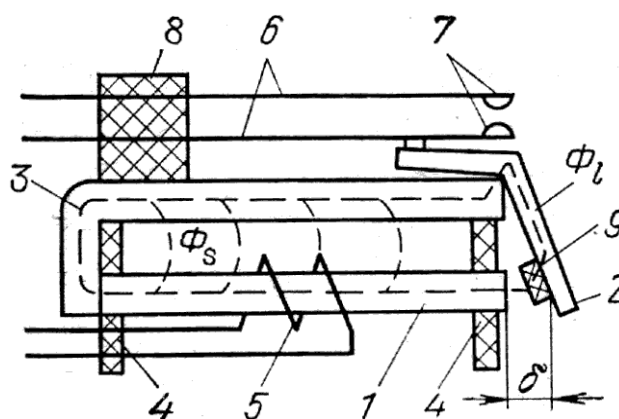


Рис. 4.1. Конструкция электромагнитного реле: 1 – сердечник; 2 – якорь; 3 – основание; 4 – катушка; 5 – обмотка; 6 – пружина; 7 – контакты; 8 – колодка; 9 – бронзовая пластина

сердечнику. За счет бронзовой пластины 9, расположенной на якоре, обеспечивается воздушный зазор между якорем и сердечником. Якорь воздействует на контакты пружины, осуществляя их замыкание.

При выключении тока из обмотки реле исчезает магнитный поток, удерживающий якорь у сердечника. После этого якорь возвращается в исходное состояние под воздействием возвращающей и контактных пружин.

Процесс перехода якоря реле из исходного в рабочее состояние называется срабатыванием реле, а обратный переход – отпуском реле.

Контактные реле получили наибольшее распространение в эксплуатируемых устройствах железнодорожной автоматики и телемеханики благодаря их простоте и надежности работы. Они дают возможность одновременного независимого переключения нескольких выходных цепей постоянного и переменного тока. При этом выходные цепи оказываются гальванически не связанными одна с другой и с входной цепью.

Достоинствами реле также являются малые потери мощности в контактном переходе, практически бесконечное отношение сопротивлений контакта в разомкнутом и замкнутом состояниях, независимость от воздействия электрических и магнитных полей, высокая электрическая прочность и др. Недостатки контактных реле: относительно большие размеры и масса, небольшой срок службы при работе в импульсном режиме, недостаточное быстродействие (обусловленное наличием механических перемещений при работе реле).

Конструкция катушки фактически определена конструкцией и размерами магнитной системы реле. По форме различают круглые и прямоугольные катушки реле. Круглая катушка характеризуется внутренним  $D_{BH}$  и наружным  $D_{HAP}$  диаметрами намотки, длиной намотки  $L_H$ , длиной каркаса катушки  $L_K$ , высотой окна  $H$ . Сечение катушки при продольном разрезе катушки называется **окном намотки** (рис. 4.2).

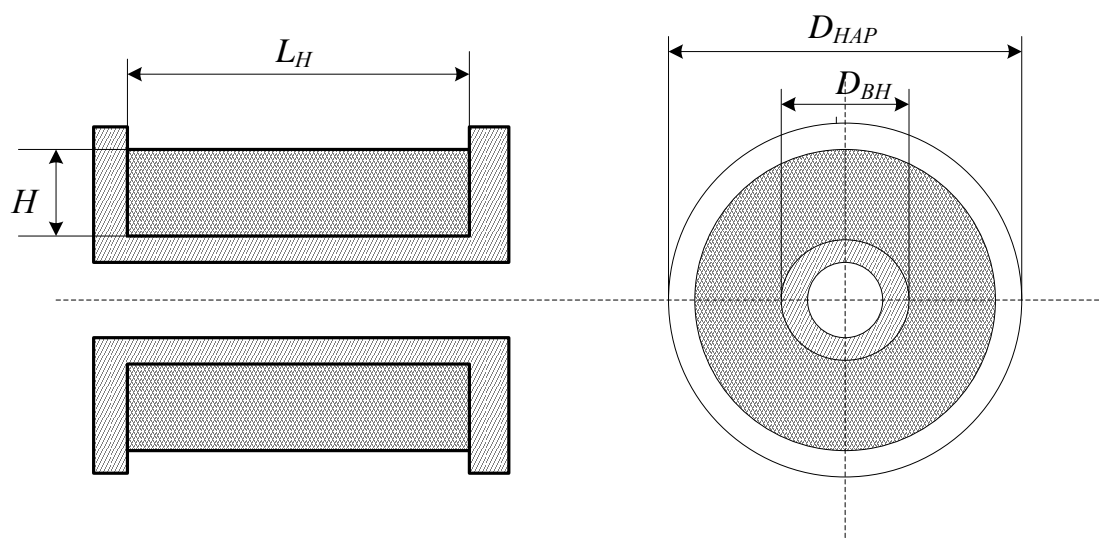


Рис. 4.2. Сечение круглой катушки электромагнитного реле

### **Классификация реле**

По надежности действия реле подразделяют на первый и низшие классы надежности.

По принципу действия реле подразделяют на следующие типы: электромагнитные, индукционные, электротермические.

По роду питающего тока реле подразделяют на реле постоянного, переменного и постоянно-переменного тока. Реле постоянного тока подразделяют на нейтральные, поляризованные и комбинированные.

В зависимости от времени срабатывания реле делятся на быстродействующие, нормальнодействующие, медленнодействующие, временные.

В зависимости от числа обмоток на сердечнике электромагнитные реле классифицируются на однообмоточные, двухобмоточные, многообмоточные.

### **4.2. Расчет параметров электромагнитного реле**

Расчет производится для основных параметров, характеризующих работу нейтрального электромагнитного реле постоянного тока.

Площадь воздушного зазора, мм<sup>2</sup>,

$$S_{\delta} = \pi \frac{D^2}{4},$$

где  $D$  – диаметр катушки.

Величина магнитного потока зависит от намагничивающей силы и площади воздушного зазора и определяется по формуле, Вб,

$$\Phi_{\delta} = \sqrt{\frac{F \cdot S_{\delta}}{4 \cdot 10^5}},$$

где  $F$  – намагничивающая сила.

Магнитная индукция, Тл,

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{S_{\delta}},$$

а магнитное напряжение, приходящееся на воздушный зазор, рассчитывается по следующей формуле, А:

$$I \cdot \omega_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta,$$

где  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная проницаемость.

Необходимо рассчитать параметры электромагнитного реле. Исходные данные для расчета взять из табл. 4.1 согласно варианту. Номер варианта определяется по последней цифре шифра зачетной книжки студента.

Таблица 4.1

**Исходные данные для расчета электромагнитного реле**

№ варианта	$F$ , Н	$D$ , мм	$\delta$ , мм
0	100	25	1,0
1	50	20	0,2
2	90	12	0,9
3	40	17	0,1
4	100	29	1,2
5	130	30	1,5
6	150	35	1,8
7	80	10	1,0
8	60	12	1,5
9	120	40	1,7

Результаты расчета сводятся в табл. 4.2.

Таблица 4.2

**Результат расчета электромагнитного реле**

$S_{\delta}$ , м <sup>2</sup>	$\Phi_{\delta}$ , Вб	$B_{\delta}$ , Тл	$I \cdot \omega_{\delta}$ , А

**4.3. Расчет параметров обмотки электромагнитного реле**

В задачу расчета обмотки реле входит определение физических размеров, характеризующих обмотку электромагнитного реле.

Длина окна намотки, мм,

$$L_K = b - a' - b',$$

где  $b$  – наружный размер обмотки;  $a'$  и  $b'$  – толщина щек катушки.

Внутренний диаметр намотки зависит от высоты окна и диаметра сердечника и рассчитывается по формуле, мм,

$$D_{BH} = d_c + 2 \cdot h,$$

где  $d_c$  – диаметр сердечника;  $h$  – высота окна.

Наружный диаметр, мм,

$$D_{НАР} = D_{ВН} + 2 \cdot d_C.$$

Площадь окна, мм<sup>2</sup>,

$$Q_o = d_C \cdot L_K.$$

Средняя длина витка, мм,

$$L_{CP} = \frac{\pi (D_{НАР} + D_{ВН})}{2}.$$

Диаметр обмотки провода, мм,

$$d = \sqrt{\frac{4\rho L_{CP} F}{U\pi}},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала провода;  $F$  – намагничивающая сила;  $U$  – напряжение в обмотке.

Необходимо произвести расчет параметров обмотки реле. Исходные данные для расчета взять из табл. 4.3 согласно варианту. Номер варианта определяется по предпоследней цифре шифра зачетной книжки студента.

Таблица 4.3

**Исходные данные для расчета обмотки электромагнитного реле**

№ варианта	$b$ , мм	$d_c$ , мм	$U$ , В	$a'$ , мм	$b'$ , мм	$\rho$ , Ом·м	$F$ , Н	$H$ , мм
0	80	8	10	5	7	0,0175	90,185	0,25
1	100	10	14	4	6	0,0275	97,035	0,35
2	70	15	16	6	8	0,0375	955,895	0,45
3	60	20	18	8	1	0,0475	500,123	0,55
4	110	25	20	10	12	0,0575	569,176	0,65
5	130	30	22	12	14	0,0675	718,264	0,75
6	140	35	18	15	17	0,0775	824,354	0,85
7	170	50	22	18	20	0,0875	725,612	0,9
8	90	25	24	17	19	0,0575	850,780	0,65
9	120	40	20	20	22	0,0675	956,754	0,85

Результаты расчета сводятся в табл. 4.4.

Таблица 4.4

**Результат расчета обмотки электромагнитного реле**

$L_K$ , мм	$D_{ВН}$ , мм	$D_H$ , мм	$Q_o$ , мм <sup>2</sup>	$L_{CP}$ , м	$d$ , мм

#### 4.4. Пример расчета параметров электромагнитного реле

*Исходные данные для расчета параметров электромагнитного реле:*

намагничивающая сила  $F_K = 80$  Н;

диаметр катушки  $D = 14$  мм  $= 14 \cdot 10^{-3}$  м;

воздушный зазор между сердечником и якорем  $\delta = 0,15$  мм  $= 1,5 \cdot 10^{-4}$  м.

Пример расчета:

1) площадь воздушного зазора  $S_\delta = \frac{3,14 \cdot 0,014^2}{4} = 1,54 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>;

2) величина магнитного потока  $\Phi_\delta = \sqrt{\frac{80 \cdot 1,54 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^5}} = 1,75 \cdot 10^{-4}$  Вб;

3) магнитная индукция  $B_\delta = \frac{1,78 \cdot 10^{-4}}{1,54 \cdot 10^{-4}} = 1,14$  Тл;

4) магнитное напряжение, приходящееся на воздушный зазор,  
 $I \cdot \omega_\delta = \frac{1,14 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 136$  А.

*Исходные данные для расчета параметров обмотки электромагнитного реле:*

наружный размер обмотки  $b = 90$  мм;

диаметр сердечника  $d_c = 8$  мм;

напряжение в обмотке  $U = 12$  В;

толщина щек катушки:  $a' = 2$  мм;  $b' = 4$  мм;

удельное сопротивление материала провода  $\rho = 0,0175$  Ом·м;

намагничивающая сила  $F = 307,6$  Н;

высота окна  $h = 0,25$  мм.

Пример расчета:

1) длина окна обмотки  $L_K = 90 - 2 - 4 = 84$  мм;

2) внутренний диаметр обмотки  $D_{BH} = 8 + 2 \cdot 0,25 = 8,5$  мм;

3) наружный диаметр обмотки  $D_{HAP} = 8,5 + 2 \cdot 8 = 24,5$  мм;

4) площадь окна  $Q_o = 8 \cdot 84 = 672$  мм<sup>2</sup>;

5) средняя длина витка  $L_{CP} = \frac{3,14 \cdot (24 + 8,5)}{2} = 61,8$  мм  $= 61,8 \cdot 10^{-3}$  м;

6) диаметр обмотки провода  $d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0175 \cdot 61,8 \cdot 10^{-3} \cdot 307,6}{12 \cdot 3,14}} = 0,188$  мм.



## Контрольные вопросы для самопроверки

1. В чем различие нейтральных и поляризованных электромагнитных реле?
2. Какие этапы работы электромагнитного реле существуют?
3. Назовите типы нейтральных электромагнитных реле.
4. Какие виды настройки контактов поляризованного реле существуют?
5. Из каких материалов изготавливаются контакты и контактные пластины?
6. Приведите магнитную систему поляризованного реле.
7. Опишите виды и форму контактов реле. Назовите режимы работы контактов реле.
8. Опишите методы гашения дуги и искры.
9. Приведите временные характеристики реле.
10. Перечислите классы надежности и особенности маркировки реле.
11. Какие виды настройки контактов поляризованного реле существуют?
12. Расшифруйте названия реле: ИМШ, ИМШТ, ИМШМ, АОШ, КДР, КДРШ, НМШ, ДСШ, СКПШ, НТШ, КШ, ИПШ, ПМПШ, КМШ, ИМВШ, АПШ, АСШ, НМПШ, ОМШМ, АИВШ, АОШ, НМВШ, АИШМТ, АИШМ, НМШМ.

## 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УСТРОЙСТВА АВТОМАТИКИ И МАГНИТНОГО УСИЛИТЕЛЯ

### 5.1. Назначение и принцип работы клапанного электромагнита

Исполнительные устройства в системах автоматики предназначены для приведения в действие различных регулирующих органов, оказывающих непосредственное воздействие на объект управления с целью достижения выходной величиной этого объекта требуемого значения. Существует большое разнообразие регулирующих органов: для изменения подачи жидкостей и газов в трубопроводах устанавливаются заслонки, клапаны, шиберы и краны; в подъемно-транспортных устройствах это различные контакторы, муфты, тормоза, вариаторы скорости; в осветительных и нагревательных электроустановках это различные коммутационные аппараты.

Входным сигналом исполнительного устройства в электрических системах автоматики является электрический ток или напряжение, а выходным сигналом – механическое перемещение. Для преобразования

электрической энергии в механическую служат электромагниты и электродвигатели.

*Приводные электромагниты* служат для выполнения механической работы. При подаче питания они перемещают различные исполнительные устройства: клапаны, толкатели, заслонки, золотники, железнодорожные стрелки. Они перемещают контакты реле и контакторов, печатающие и перфорирующие устройства. Для выполнения этой работы электромагниты должны быть рассчитаны на определенную силу и перемещение.

*Удерживающие электромагниты* служат не для перемещения, а лишь для удерживания ферромагнитных деталей. Например, электромагнит, используемый при подъеме железного металлолома, только удерживает его, а перемещение осуществляется подъемным краном. В этом случае электромагнит выполняет лишь роль крюка подъемного крана. В металлообработке используются электромагнитные плиты для фиксации обрабатываемой детали на станке. Известны также электромагнитные замки. Поскольку удерживающие электромагниты не совершают работы, они рассчитываются лишь на определенное усилие. В некоторых случаях электромагнит имеет две катушки: одна, более мощная, используется для перемещения якоря, а другая – лишь для удерживания якоря в притянутом положении.

Существует множество электромагнитов специального назначения. Они используются для фокусировки электронных пучков в телевидении, в ускорителях элементарных частиц, в разнообразных измерительных приборах, медицинской аппаратуре и т.д.

По конструктивному выполнению различают клапанные (поворотные), прямоходовые и электромагниты с поперечным движением.

Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод электромагнитов переменного тока собирают (шихтуют) из изолированных пластин толщиной 0,35 или 0,5 мм. В качестве материала используются горячекатаные и холоднокатаные электротехнические стали. Отдельные части магнитопровода, которые трудно выполнить шихтованными, изготавливают из сплошного материала толщиной 2–3 мм.

Катушки электромагнитов по своей конструкции бывают каркасные и бескаркасные, а по форме сечения – круглые и прямоугольные. Провод каркасной катушки наматывают на каркас из изоляционного материала (текстолит, гетинакс, пластмасса). Провод бескаркасной катушки наматывают прямо на сердечник, обмотанный изоляционной лентой, или на специальный шаблон. Для обеспечения прочности катушки, выполненной на шаблоне, ее обматывают лентой (бандажируют) и пропитывают компаундным лаком. Катушки, как правило, наматывают медным проводом с изоляцией, выбираемой исходя из назначения и условий работы электромагнита.

В зависимости от способа включения различают последовательные и параллельные катушки. Параллельные катушки имеют большое число витков и наматываются тонким проводом. Обычно они включаются на полное напряжение сети. Последовательные катушки имеют сравнительно малое сопротивление, так как выполняются толстым проводом и с малым числом витков. Ток такой катушки определяется не ее сопротивлением, а зависит от тех устройств, с которыми катушка включена последовательно.

Различают также электромагниты, предназначенные для длительной, кратковременной и повторно-кратковременной работы.

Исходными данными для расчета электромагнита обычно являются требуемое тяговое усилие  $F_{\text{Э}}$ , ход (или угол поворота) якоря и напряжение питания  $U$ , также могут быть заданы требуемые быстродействие, габариты, вес, стоимость. В результате расчета необходимо выбрать конструкцию электромагнита, материал магнитопровода, определить геометрические размеры магнитопровода и катушки, обмоточные данные.

*Клапанные электромагниты* используются в тех случаях, когда требуется малый ход подвижного элемента пневмоконтакта. Вариация величины усилия и характер его изменения в функции перемещения обеспечиваются в сравнительно узком диапазоне путем изменения формы и размеров полюсных наконечников и якоря, а также изменением отношения длины стержня магнитопровода к площади его сечения. Клапанные электромагниты отличаются большой скоростью срабатывания и весьма подробно описаны в литературе, посвященной электромагнитным реле.

## 5.2. Расчет основных параметров клапанного электромагнита

Клапанные электромагниты имеют небольшое перемещение якоря (несколько миллиметров) и развивают большое тяговое усилие.

Конструктивный фактор, Н/см,

$$A = \frac{\sqrt{F_{\text{Э}}}}{\delta},$$

где  $F_{\text{Э}}$  – тяговое усилие;  $\delta$  – ход якоря.

Индукция в зазоре  $B_{\delta}$ , Тл (выбирается по зависимости  $B_{\delta} = f(A)$ ).

Площадь сечения полюсного наконечника, мм<sup>2</sup>,

$$S = \frac{F_{\text{Э}}}{4 \cdot B_{\delta}^2 \cdot 10^5},$$

(получено из формулы  $F_{\text{Э}} = 4 \cdot B_{\delta}^2 \cdot S \cdot 10^5$ ).

Сечения сердечника магнитопровода, мм<sup>2</sup>,

$$S_C = S_{Я} = \frac{\sigma B_{\delta} S}{B_{СТ}},$$

где  $S_{Я}$  – площадь сечения яра магнитопровода;  $B_{ст}$  – индукция в стали;  $\sigma$  – коэффициент рассеяния магнитной системы.

Сечение яра магнитопровода равно площади сечения сердечника магнитопровода.

Сечение якоря магнитопровода, мм<sup>2</sup>,

$$S_{ЯК} = \frac{S_C}{\delta}.$$

Полная МДС катушки, А,

$$I \cdot \omega = \frac{B_{\delta} \delta}{\mu_0 (1 - \alpha)},$$

где  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий отношение МДС, не участвующей в создании тягового усилия, к общей МДС катушки.

Необходимо определить основные параметры клапанного электромагнита. Исходные данные для расчета взять из табл. 5.1 согласно варианту. Номер варианта определяется по последней цифре шифра зачетной книжки студента.

Таблица 5.1

### Исходные данные для расчета клапанного электромагнита

№ варианта	$F_{Э}$ , Н	$\delta$ , мм	$B_{СТ}$ , Тл	$\sigma$	$\alpha$	$\mu_0$
0	155	0,5	1,2	1,5	0,2	$4\pi \cdot 10^{-7}$
1	185	0,6	1,25	1,5	0,2	
2	195	0,7	1,3	1,75	0,3	
3	250	0,8	1,35	1,75	0,3	
4	300	1,0	1,4	2,0	0,4	
5	325	0,9	1,45	2,0	0,4	
6	225	1,1	1,5	2,25	0,5	
7	150	1,2	1,55	2,25	0,5	
8	310	2,0	1,6	2,5	0,6	
9	180	2,5	1,65	2,5	0,6	

Результаты расчета сводятся в табл. 5.2.

### Результат расчета клапанного электромагнита

$A$ , Н/см	$B_{\delta}$ , Тл	$S$ , мм <sup>2</sup>	$S_C$ , мм <sup>2</sup>	$S_{Я}$ , мм <sup>2</sup>	$S_{ЯК}$ , мм <sup>2</sup>	$I \cdot \omega$ , А

### 5.3. Принцип работы и назначение магнитных усилителей

Магнитный усилитель (МУ) – это статическое электромагнитное устройство, состоящее из сердечника и наложенных на него обмоток, предназначенное для усиления электрического сигнала по току, напряжению или мощности.

Принцип действия магнитного усилителя основан на изменении индуктивности катушки с ферромагнитным сердечником при подмагничивании ее постоянным током. С помощью такого аппарата можно регулировать большие токи посредством сравнительно слабых электрических сигналов.

Существуют магнитные усилители с насыщающимися реакторами и с самонасыщением (с самоподмагничиванием).

Магнитные усилители нашли широкое применение в электроприводах металлорежущих станков из-за их надежности и большого срока службы (он считается одним из самых надежных элементов систем автоматики), отсутствия подвижных частей, возможности исполнения магнитных усилителей мощностью от долей ватта до сотен киловатт, большой прочности и стойкости по отношению к вибрациям и ударной нагрузке. Кроме этого, благодаря магнитным усилителям можно легко осуществить суммирование сигналов. Они имеют большой коэффициент усиления. В магнитных усилителях отсутствует электрическая связь между входными и выходными цепями.

Конструктивно магнитный усилитель представляет собой сердечник из листового ферромагнитного материала, на который намотаны обмотки переменного и постоянного тока. Для устранения наводок эдс переменного тока цепи обмоток постоянного тока обмотки переменного тока намотаны отдельно на сердечниках, а обмотки постоянного тока охватывают оба сердечника (рис. 5.1).

*Обратной связью в усилителе называется воздействие выходного тока или напряжения на его вход. Она может быть внешней и внутренней. Для создания внешней обратной связи в усилителях предусматривают специальную обмотку, которая дополнительно подмагничивает или размагничивает сердечник. Она располагается на сердечнике так же, как и обмотки управления и смещения, и питается выпрямленным*

током, пропорциональным току нагрузки или напряжению на нагрузке. Обратная связь может быть положительной и отрицательной. Если при возрастании тока нагрузки или напряжения на нагрузке обмотка обратной связи усиливает действие входного сигнала, то обратная связь называется положительной. Ее используют для повышения коэффициента усиления.

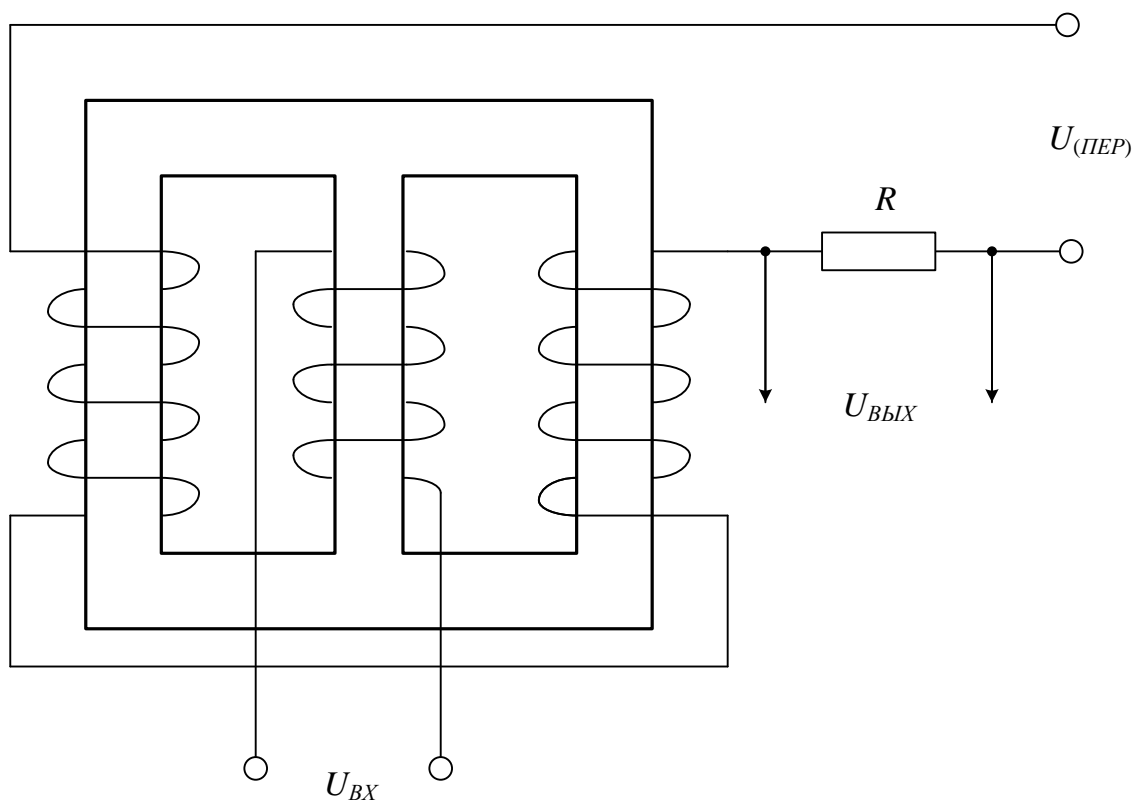


Рис. 5.1. Схема простейшего магнитного усилителя

Если же при возрастании тока или напряжения на нагрузке обмотка обратной связи ослабляет действие входного сигнала, то связь называется отрицательной. Такую связь вводят в системы автоматического регулирования для повышения устойчивости их работы.

#### 5.4. Расчет основных параметров магнитного усилителя с внешней обратной связью

В задачу расчета параметров магнитного усилителя с внешней обратной связью (ОС) входит определение размеров сердечника, расчет мощностей.

Мощность нагрузки, Вт,

$$P_H = I_H^2 \cdot R_H.$$

Мощность управления, Вт,

$$P_Y = I_Y^2 \cdot R_Y,$$

где  $I_H$ ,  $I_Y$  – токи на входе и на выходе;  $R_H$ ,  $R_Y$  – сопротивления нагрузки и цепи управления.

Коэффициент усиления по мощности

$$K_P = \frac{P_H}{P_Y}.$$

Величина напряжения питания схемы, В,

$$U_C = (1,2 \div 2,0) \cdot I_H \cdot R_H.$$

Удельное количество витков рабочей обмотки:

$$\frac{\omega_P}{L_{CP}} = \frac{H \sim_{\max}}{I_H},$$

где  $H \sim_{\max}$  – максимальная напряженность поля;  $I_H$  – максимальный ток нагрузки.

Основной размер сердечника

$$a = \sqrt[3]{\frac{U_C \cdot 10^4}{2 \cdot 4,44 \cdot f \cdot \frac{\omega_P}{L_{CP}} \cdot K_B \cdot K_{CP} \cdot B}},$$

где  $f$  – частота переменного тока;  $K_B$ ,  $K_{CP}$  – постоянные для данного сердечника;  $B$  – индукция.

Необходимо рассчитать основные размеры сердечника МУ с внешней ОС. Исходные данные для расчета взять из табл. 5.3 согласно варианту. Номер варианта определяется по предпоследней цифре шифра зачетной книжки студента.

Таблица 5.3

**Исходные данные для расчета сердечника МУ с внешней ОС**

№ варианта	$I_H$ , $10^{-3}$ А	$R_H$ , Ом	$R_Y$ , Ом	$I_Y$ , $10^{-4}$ А	$f$ , Гц	$H \sim_{\max}$ , В	$K_B$	$K_{CP}$	$B_{ст}$ , Тл
0	5	600	650	3	50	0,75	1	20	0,45
1	6	650	650	3	50	0,75	1	20	0,45
2	6	680	670	4	50	0,75	1	20	0,45
3	7	660	680	3	50	0,75	1	25	0,45
4	8	750	660	5	50	0,75	1	20	0,45
5	8	630	650	3	50	0,75	1	20	0,45
6	9	670	690	5	50	0,75	1	25	0,45
7	9	690	680	5	50	0,75	1	25	0,45
8	10	700	720	3	50	0,75	1	20	0,45
9	10	730	710	4	50	0,75	1	20	0,45

Результаты расчета сводятся в табл. 5.4.

Таблица 5.4

**Результат расчета сердечника МУ с внешней ОС**

$P_H$ , Вт	$P_Y$ , Вт	$K_P$	$U_C$ , В	$\omega_p/L_{CP}$	$a$

**5.5. Пример расчета параметров клапанного электромагнита и магнитного усилителя**

*Исходные данные для расчета параметров клапанного электромагнита:*

тяговое усилие  $F_{\mathcal{E}} = 256$  Н;

ход якоря  $\delta = 16$  мм = 1,6 см =  $1,6 \cdot 10^{-2}$  м;

индукция в стали  $B_{CT} = 1,2$  Тл;

коэффициент рассеяния магнитной системы  $\sigma = 2$ ;

коэффициент, характеризующий отношение МДС, не участвующей в создании тягового усилия к общей МДС катушки,  $\alpha = 0,15$ ;

магнитная постоянная  $\mu_0 = 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}$  Гн/м,

индукция в зазоре  $B_{\delta}$ , выбирается по графику зависимости  $B_{\delta} = f(A)$  по справочнику  $B_{\delta} = 1,1$  Тл.

Пример расчета:

1) конструктивный фактор  $A = 10$  Н/см;

2) площадь сечения полюсного наконечника  $S = 250/4 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 10^5 = 5,2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> = 5,2 см<sup>2</sup>;

3) сечения сердечника магнитопровода  $S_C = 2 \cdot 1,1 \cdot 5,2/1,2 = 9,7$  см<sup>2</sup>;

4) сечение ярма магнитопровода  $S_{Я} = 9,7$  см<sup>2</sup>;

5) сечение якоря магнитопровода  $S_{ЯК} = 9,7/2 = 4,85$  см<sup>2</sup>;

6) полная МДС катушки  $I \cdot \omega = 1,1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-2}/4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} (1 - 0,15) = 16 \cdot 10^3$  А.

*Исходные данные для расчета параметров магнитного усилителя с внешней ОС:*

максимальный ток нагрузки на входе  $I_H = 6$  А;

сопротивления нагрузки  $R_H = 650$  Ом;

сопротивления цепи управления  $R_Y = 660$  Ом;

ток на выходе  $I_Y = 3$  А;

частота переменного тока  $f = 50$  Гц;

постоянные для заданного сердечника  $K_B = 1$ ,  $K_{CP} = 20$ ;

индукция  $B = 0,45$  Тл;

максимальная напряженность поля  $H_{\sim \max} = 0,75$ .



Пример расчета:

1) мощность нагрузки  $P_H = (6 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 650 = 2,34 \cdot 10^{-2}$  Вт;

2) мощность управления  $P_V = (3 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 660 = 5,94 \cdot 10^{-5}$  Вт;

3) коэффициент усиления по мощности  $K_P = \frac{2,34 \cdot 10^{-2}}{5,94 \cdot 10^{-5}} = 394$ ;

4) напряжения питания схемы  $U_C = 1,5 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 650 = 5,85$  В;

5) удельное количество витков рабочей обмотки  $\frac{\varpi_P}{L_{CP}} = \frac{0,75}{6 \cdot 10^{-3}} = 125$ ;

6) основной размер сердечника  $a = \sqrt[3]{\frac{5,85 \cdot 10^4}{2 \cdot 4,44 \cdot 125 \cdot 1 \cdot 20 \cdot 0,45 \cdot 50}} = 1,8$ .

### Контрольные вопросы для самопроверки

1. На какие типы делятся электромагниты по конструктивному исполнению?
2. Почему клапанные электромагниты развивают большое тяговое усилие?
3. На чем основан принцип действия магнитного усилителя?
4. Для чего в схемы магнитных усилителей вводится обратная связь?
5. Какие магнитные усилители с внешней обратной связью существуют?
6. Каков принцип применения магнитных усилителей?
7. Назовите особенности применения и достоинства клапанных электромагнитов.

## 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРОРЕЗОНАНСНОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

### 6.1. Принцип работы феррорезонансного стабилизатора напряжения

Феррорезонансный стабилизатор напряжения служит для стабилизации переменного напряжения. Его основной недостаток – низкий коэффициент мощности. Для уменьшения веса и габаритов ферромагнитные стабилизаторы напряжения изготавливают с объединенной магнитной системой, а для повышения коэффициента мощности включают конденсатор по схеме резонанса токов.

Феррорезонансные стабилизаторы напряжения конструктивно похожи на обычные трансформаторы (рис. 6.1). Первичная обмотка  $W_1$ , на

которую подается входное напряжение  $U_{BX}$ , располагается на участке 2 магнитопровода, имеющем большое поперечное сечение для того, чтобы эта часть магнитопровода находилась в ненасыщенном состоянии. Напряжение  $U_{BX}$  создает магнитный поток  $\Phi_2$ .

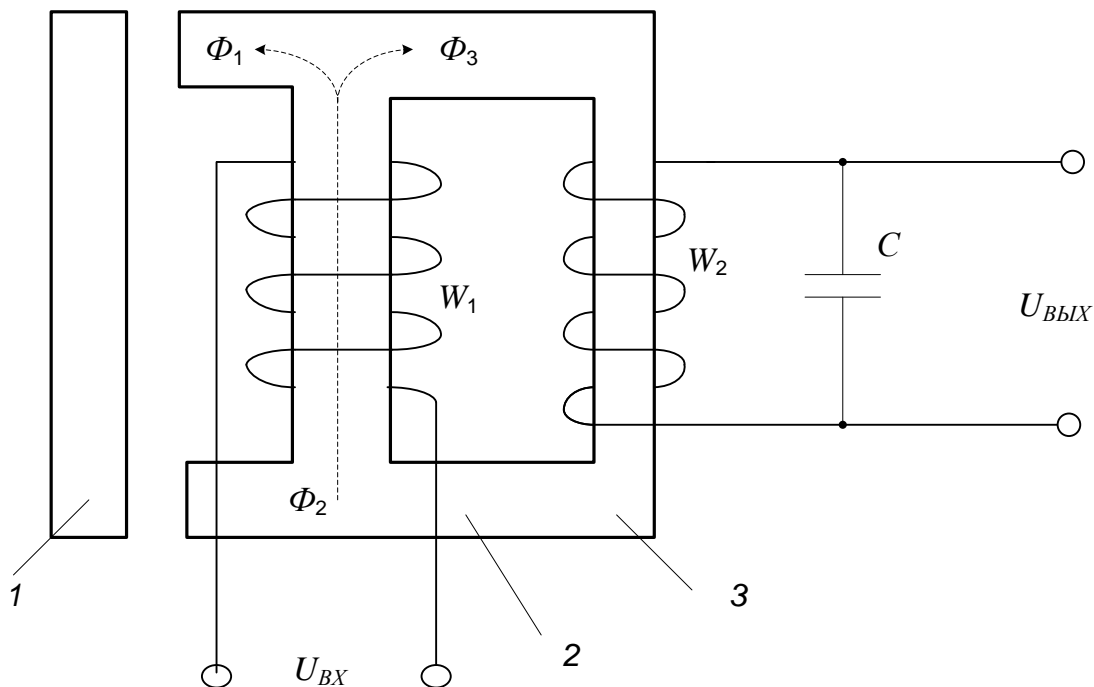


Рис. 6.1. Принципиальная схема феррорезонансного стабилизатора напряжения: 1 – магнитный шунт; 2, 3 – участки магнитного провода

Вторичная обмотка  $W_2$ , на зажимах которой индуцируется выходное напряжение  $U_{BЫX}$  и к которой присоединяется нагрузка, расположена на участке 3 магнитопровода, имеющем меньшее сечение и находящемся в насыщенном состоянии. Поэтому при отклонениях напряжения  $U_{BX}$  и магнитного потока  $\Phi_2$  значение магнитного потока  $\Phi_3$  на участке 3 почти не изменяется, не изменяется эдс вторичной обмотки и  $U_{BЫX}$ . При увеличении потока  $\Phi_2$  та его часть, которая не может проходить по участку 3, замыкается через магнитный шунт 1 ( $\Phi_1$ ).

Магнитный поток  $\Phi_2$  при синусоидальном напряжении  $U_{BX}$  синусоидален. Когда мгновенное значение потока  $\Phi_2$  приближается к амплитудному, участок 3 переходит в режим насыщения, поток  $\Phi_3$  перестает увеличиваться и появляется поток  $\Phi_1$ . Таким образом, поток через магнитный шунт 1 замыкается только в те моменты времени, когда поток  $\Phi_2$  по значению близок к амплитудному. Это делает поток  $\Phi_3$  несинусоидальным, напряжение  $U_{BЫX}$  становится также несинусоидальным, в нем ярко выражена третья гармоническая составляющая.

Исследование стабилизатора основано на нижеприведенных допущениях: искажение кривой напряжения и фазовый сдвиг напряжений на

ненасыщенном и насыщенном стержнях не учитываются; расчет производится по приближенным формулам для заданного среднего значения входного напряжения.

Феррорезонансный стабилизатор – один из самых старых типов стабилизаторов напряжения. В настоящее время применяется довольно редко из-за множества недостатков.

*К достоинствам можно отнести:* высокое быстродействие, регулирование напряжения без разрыва фазы, относительную простоту схемы и соответственно достаточно высокую надежность.

*К недостаткам феррорезонансных стабилизаторов относятся:* высокая шумность, узкий диапазон входного напряжения (176–256 В), искажения синусоидальности напряжения и помехи (подключение цифровой аппаратуры только с установкой фильтра помех), большая масса и габариты, ограничение по нагрузочной способности (недопустимость работы на холостом ходу и нагрузках менее 20 %, недопустимость перегрузки), мощности от 200 ВА до 100 кВА.

## 6.2. Расчет параметров феррорезонансного стабилизатора напряжения

Активное сечение стали ненасыщенного стержня, см<sup>2</sup>,

$$S_{CT1} = 1,1\sqrt{P_H}.$$

Активное сечение стали насыщенного стержня, см<sup>2</sup>,

$$S_{CT2} = 0,6S_{CT1}.$$

Число вольт на один виток первичной обмотки, В,

$$e_0 = 0,022S_{CT1}.$$

Напряжение на конденсаторе, В,

$$U_C \approx 0,65U_P,$$

где  $U_P$  – допустимое рабочее напряжение.

Емкость конденсатора, Ф,

$$C = \frac{13\,000P_H}{U_C^2}.$$

Число витков обмоток стабилизатора:

а) первичная обмотка  $W_1 = \frac{U_{BX}}{e_0};$

б) вторичная обмотка  $W_2 = \frac{1,43U_H}{e_0};$

в) компенсационная обмотка  $W_K = 0,25W_2;$

г) обмотка  $W_3 = \frac{U_C}{e_0} - W_2.$

Ток в обмотках, А,

а) 
$$I_1 = \frac{2P_H}{U_{BX}};$$

б) 
$$I_3 = \frac{1,5P_H}{U_H};$$

в) 
$$I_K = I_H = \frac{P_H}{U_H};$$

г) 
$$I_2 = \sqrt{I_K^2 + I_3^2}.$$

Диаметр провода обмоток, мм:

а) 
$$d_1 = \frac{4I_1}{3,14J};$$

б) 
$$d_3 = \frac{4I_3}{3,14};$$

в) 
$$d_K = \frac{4I_K}{3,14J};$$

г) 
$$d_2 = \frac{4I_2}{3,14J},$$

где  $J$  – допустимая плотность тока.

Необходимо определить основные параметры феррорезонансного стабилизатора напряжения. Исходные данные для расчета взять из табл. 6.1 согласно варианту. Номер варианта определяется по последней цифре шифра зачетной книжки студента.

Таблица 6.1

**Исходные данные для расчета  
феррорезонансного стабилизатора напряжения**

№ варианта	$P_H$ , Вт	$U_H$ , В	$U_{BX}$ , В	$U_P$ , В	$J$ , А/мм
0	50	150	170	500	1,6
1	60	160	200	500	1,6
2	70	170	140	600	1,6
3	80	180	200	600	1,6
4	90	190	160	700	1,6
5	100	200	180	550	1,6
6	55	210	170	450	1,6
7	65	220	180	650	1,6
8	67	140	160	500	1,6
9	85	180	200	400	1,6

Результаты расчета сводятся в табл. 6.2

Таблица 6.2

**Результат расчета феррорезонансного стабилизатора напряжения**

$S_1, \text{см}^2$	$S_2, \text{см}^2$	$e_0, \text{В}$	$U_C, \text{В}$	$C, \text{Ф}$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_K$

$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$I_3, \text{А}$	$I_K, \text{А}$	$d_1, \text{мм}$	$d_2, \text{мм}$	$d_3, \text{мм}$	$d_K, \text{мм}$

**6.3. Пример расчета параметров феррорезонансного стабилизатора напряжения**

*Исходные данные для расчета:*

мощность  $P_H = 70 \text{ Вт}$ ;

напряжение  $U_H = 170 \text{ В}$ ;

напряжение на входе  $U_{BX} = 170 \text{ В}$ ;

допустимое рабочее напряжение  $U_p = 500 \text{ В}$ ;

допустимая плотность тока  $J = 1,6 \text{ А/мм}$ .

Пример расчета:

1) активное сечение стали ненасыщенного стержня  $S_{CT1} = 1,1 \cdot \sqrt{70} = 9,2 \text{ см}^2$ ;

2) активное сечение стали насыщенного стержня  $S_{CT2} = 0,6 \cdot S_{CT1} = 0,6 \cdot 9,2 = 5,5 \text{ см}^2$ ;

3) число вольт на один виток первичной обмотки  $e_0 = 0,022 \cdot S_{CT1} = 0,022 \cdot 9,2 = 0,2 \text{ В}$ ;

4) напряжение на конденсаторе  $U_C = 0,65 \cdot U_p = 0,65 \cdot 500 = 325 \text{ В}$ ;

5) емкость конденсатора  $C = 13\,000 \cdot P_H / U_{C2} = 13\,000 \cdot 70 / 325 \cdot 325 = 9 \text{ Ф}$ ;

6) число витков обмоток стабилизатора:  $W_1 = U_{BX} / e_0 = 170 / 0,2 = 850$ ;  
 $W_2 = 1,43 \cdot U_H / e_0 = 1,43 \cdot 170 / 0,2 = 1215$ ;  $W_K = 0,25 \cdot W_2 = 0,25 \cdot 1215 = 304$ ;  
 $W_3 = U_C / e_0 - W_2 = 325 / 0,2 - 1215 = 410$ ;

7) ток в обмотках  $I_1 = 2 \cdot P_H / U_{BX} = 2 \cdot 70 / 170 = 0,8 \text{ А}$ ;  $I_3 = 1,5 \cdot P_H / U_H = 1,5 \cdot 70 / 170 = 0,6 \text{ А}$ ;  $I_K = I_H = P_H / U_H = 70 / 170 = 0,4 \text{ А}$ ;  $I_2 = 0,76 \text{ А}$ ;

8) диаметр провода обмоток, мм:  $d_1 = \frac{4 \cdot 0,8}{3,14 \cdot 1,6} = 0,63$ ;  $d_2 = \frac{4 \cdot 0,76}{3,14 \cdot 1,6} = 0,6$ ;

$d_3 = \frac{4 \cdot 0,6}{3,14 \cdot 1,6} = 0,47$ ;  $d_K = \frac{4 \cdot 0,4}{3,14 \cdot 1,6} = 0,31$ .

## Контрольные вопросы для самопроверки

1. В каких контурах можно получить резонансы тока и напряжения?
2. В каких контурах можно получить стабилизацию тока и напряжения?
3. Что является основным недостатком феррорезонансного стабилизатора?
4. Какие допущения возможны при исследовании феррорезонансного стабилизатора?
5. Какие типы феррорезонансных стабилизаторов существуют?

## 7. ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ДАТЧИКА АВТОМАТИКИ

Для заданного типа датчика необходимо привести принципиальную электрическую схему и описание ее работы. Кроме принципиальной электрической схемы датчика, также необходимо указать:

- область применения данного датчика;
- достоинства и недостатки;
- физический принцип преобразования и фиксации измеряемой величины в электрический сигнал.

Схемы датчиков выбираются по варианту, который определяется по последней цифре шифра зачетной книжки студента, в соответствии с приведенным ниже списком.

1. Емкостной датчик приближения.
2. Схема включения датчика Холла.
3. Индуктивный датчик приближения на основе генератора колебаний на транзисторной сборке.
4. Датчик движения на основе эффекта Доплера.
5. Акустический датчик (датчик звука).
6. Тензорезистивный датчик давления.
7. Инфракрасный датчик.
8. Датчик температуры на терморезисторе.
9. Датчик уровня воды.
10. Датчик температуры на термопаре.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сапожников, В.В. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. / В.В. Сапожников, Ю.А. Кравцов, В.В. Сапожников. – М. : ГОУ УМЦ ЖДТ, 2008.
2. Полевой, Ю.И. Основы железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие / Ю.И. Полевой. – Самара : СамГАПС, 2006. – 100 с.
3. Сороко, В.И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики : справ. В 2 кн. Кн. 1 / В.И. Сороко, В.А. Розенберг. – М. : НПФ «ПЛАНЕТА», 2002. – 696 с.
4. Сороко, В.И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики : справ. В 2 кн. Кн. 2 / В.И. Сороко, В.А. Розенберг. – М. : НПФ «ПЛАНЕТА», 2002. – 756 с.
5. Системы телеуправления на железнодорожном транспорте : учеб. для колледжей и техникумов ж.-д. трансп. / А.А. Кочетков [и др.] ; под ред. Е.П. Брижака. – М. : Маршрут, 2005. – 467 с.
6. Келим, Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления / Ю.М. Келим. – М. : Форум-Инфра-М, 2002. – 383 с.
7. Шишмарев, В.Ю. Типовые элементы системы автоматического управления / В.Ю. Шишмарев. – М. : Академия, 2004. – 304 с.
8. Подлипенский, В.С. Элементы и устройства автоматики / В.С. Подлипенский, Ю.А. Сабинин, Л.Ю. Юрчук. – СПб. : Политехника, 1995. – 472 с.
9. Датчики : справ. пособие / В.М. Шарапов [и др.] ; под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. – М. : Техносфера, 2012. – 624 с.
10. Школа для Электрика [Электронный ресурс]. – Электрон. журн. – Режим доступа : <http://electricalschool.info>
11. Все о датчиках температуры [Электронный ресурс] : информ. портал // Сайт [Temperatures.ru](http://temperatures.ru). – Электрон. журн. – Режим доступа : <http://temperatures.ru>
12. Термопары. Типы, характеристики, конструкции, производство [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.metotech.ru>

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОГО И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКОВ .....	4
1.1. Принцип построения потенциометрических датчиков.....	4
1.2. Расчет параметров потенциометрического датчика .....	6
1.3. Принцип работы и виды термоэлектрических датчиков.....	7
1.4. Расчет параметров термоэлектрического датчика.....	10
1.5. Пример расчета параметров потенциометрического и термоэлектрического датчиков .....	11
2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКТИВНОГО ДАТЧИКА .....	13
2.1. Принцип работы индуктивных датчиков.....	13
2.2. Расчет индуктивности датчика .....	15
2.3. Определение параметров обмотки индуктивного датчика .....	16
2.4. Пример расчета параметров индуктивных датчиков.....	18
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКОВ.....	19
3.1. Принцип работы пьезоэлектрических датчиков.....	19
3.2. Расчет параметров пьезоэлектрического датчика .....	20
3.3. Принцип работы и построения емкостных датчиков .....	22
3.4. Расчет основных параметров емкостного датчика угловых перемещений .....	24
3.5. Пример расчета параметров пьезоэлектрического и емкостного датчиков .....	26
4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РЕЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	27
4.1. Принцип построения и работы электромагнитного реле .....	27
4.2. Расчет параметров электромагнитного реле.....	29
4.3. Расчет параметров обмотки электромагнитного реле .....	30
4.4. Пример расчета параметров электромагнитного реле .....	32
5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УСТРОЙСТВА АВТОМАТИКИ И МАГНИТНОГО УСИЛИТЕЛЯ.....	33
5.1. Назначение и принцип работы клапанного электромагнита.....	33
5.2. Расчет основных параметров клапанного электромагнита .....	35
5.3. Принцип работы и назначение магнитных усилителей.....	37
5.4. Расчет основных параметров магнитного усилителя с внешней обратной связью.....	38
5.5. Пример расчета параметров клапанного электромагнита и магнитного усилителя .....	40



6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРОРЕЗОНАНСНОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ.....	41
6.1. Принцип работы феррорезонансного стабилизатора напряжения.....	41
6.2. Расчет параметров феррорезонансного стабилизатора напряжения.....	43
6.3. Пример расчета параметров феррорезонансного стабилизатора напряжения.....	45
7. ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ДАТЧИКА АВТОМАТИКИ.....	46
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	47

Учебное издание

**Прохоренко** Артем Геннадьевич  
**Яковлева** Анна Сергеевна

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ**

Методическое пособие по выполнению контрольной работы

Редактор *Т.М. Яковенко*  
Технический редактор *С.С. Заикина*

---

План 2018 г. Поз. 2.22. Подписано в печать 17.07.2018.  
Уч.-изд. л. 3,0. Усл. печ. л. 3,2. Зак. 158. Тираж 25 экз. Цена 498 р.

---

Издательство ДВГУПС  
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.