

Министерство образования и науки Российской Федерации
Саратовский государственный технический университет

М. В. Рогова

**ДАТЧИКИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

**Учебное пособие
по дисциплине «Элементы и устройства систем управления»
для студентов по специальности 220201.65
«Управление и информатика в технических системах»**

Саратов 2012

УДК 621.313; 681.5
ББК 32.965
Р59

Рецензенты:

Кафедра «Прикладная информатика и естественно-научные дисциплины»
Филиала ФГБОУ ВПО «Российская академия народного хозяйства
и государственной службы при Президенте Российской Федерации»
Доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник
Института проблем точной механики и управления РАН
В.А. Иващенко

Одобрено
редакционно-издательским советом
Саратовского государственного технического университета

Рогова М.В.

Р59 Датчики электрических систем автоматического управления:
учеб. пособие / М.В. Рогова. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т,
2012. 88 с.
ISBN 978-5-7433-2546-7

Рассматриваются принцип действия, конструктивные особенности, расчет основных характеристик электрических датчиков перемещения, температуры, угла поворота, скорости, ускорения, деформации. Сведения, приведенные в учебном пособии, являются базовым компонентом мультимедийного обеспечения дисциплины «Элементы и устройства систем управления».

Учебное пособие предназначено для студентов, аспирантов и преподавателей технических вузов, соответствует требованиям Государственного образовательного стандарта высшей школы по техническим дисциплинам.

УДК 621.313; 681.5
ББК 32.965

ISBN 978-5-7433-2546-7

© Саратовский государственный
технический университет, 2012
© Рогова М.В., 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений	4
Введение.....	5
1. Классификация и характеристики датчиков	6
1.1 Классификация датчиков.....	6
1.2. Основные характеристики датчиков.....	6
2. Датчики перемещений	8
2.1. Линейные реостатные измерительные преобразователи.....	8
2.2. Функциональные (нелинейные) реостатные датчики.....	13
2.3. Расчет реостатных датчиков перемещений.....	15
2.4. Индуктивные датчики перемещений	17
2.5. Расчет индуктивных датчиков линейных перемещений	23
2.6. Трансформаторные датчики.....	25
2.7. Емкостные датчики перемещений	28
3. Датчики температуры.....	31
3.1. Термометры расширения.....	31
3.2. Расчет манометрических преобразователей температуры	35
3.3. Термопары.....	36
3.4. Термопреобразователи сопротивления (терморезисторы)	38
3.5. Схемы включения термопар и терморезисторов	45
4. Датчики угла поворота	48
4.1. Сельсинные датчики угла поворота.....	48
4.2. Расчет сельсинов.....	52
5. Датчики скорости	53
5.1. Датчики угловой скорости (тахогенераторы)	53
5.2. Импульсные тахометры угловой скорости.....	58
5.3. Индукционные датчики	59
6. Датчики ускорений и вибраций	61
7. Датчики напряжений и деформации.....	65
7.1. Проволочные тензодатчики	65
7.2. Фольговые, пленочные, угольные, полупроводниковые тензодатчики	67
7.3. Магнитоупругие датчики	71
8. Оптические датчики	73
Приложение	77
А. Характеристики материалов реостатных датчиков	77
Б. Расчет магнитной проводимости воздушного зазора.....	77
В. Характеристики проводов индуктивных датчиков	81
Г. Параметры термопар и терморезисторов	82
Д. Расчет параметров сельсинов	84
Е. Свойства сплавов проволочных тензодатчиков	86
Список литературы.....	87

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВУ – вычислительное устройство
ИУ – исполнительное устройство
КПД – коэффициент полезного действия
МДП – металл – диэлектрик – полупроводник
МДС – магнитодвижущая сила
МЖ – магнитная жидкость
МЖС – магнитожидкостный сенсор
ОУ – объект управления
ПТР – полупроводниковый терморезистор
РМ – рабочий механизм
САЗ – система контроля плотности
САК – сумматор чистой нефти
САР – сумматор чистого расхода
САУ – гидропривод
СД – сельсин-датчик
СП – сельсин-приемник
ТЖ – техническая жидкость
ТКС – температурный коэффициент сопротивления
ТПС – термопреобразователи сопротивления
УУ – управляющее устройство
УЗ – ультразвуковой
ЭГД – электрогидродинамический
ЭДС – электродвижущая сила

ВВЕДЕНИЕ

Основу любого автоматизированного производства составляют взаимосвязанные между собой системы автоматического управления. Эти системы предназначены для изменения технологических параметров по заданному закону с определенной точностью без вмешательства человека.

В зависимости от выполняемых функций все автоматические системы можно разделить на 4 группы: системы автоматического управления (САУ); системы автоматического регулирования (САР); системы автоматического контроля (САК); системы автоматической защиты (САЗ).

Все САУ можно подразделить на 5 видов: простые системы управления (нагрев печи); системы оптимального управления (когда скорость нагрева печи ограничена технологическим процессом); системы программного управления (обработка деталей по заданной программе на металлорежущих станках); системы экстремального управления (самостоятельно определяющие оптимальный режим работы объекта управления (ОУ)); системы функционального управления (требующие выполнения совокупности операций).

САУ представляет собой совокупность управляющего устройства (УУ) и объекта управления (ОУ).

В качестве объекта управления могут выступать различные технические устройства и комплексы, технологические или производственные процессы. На вход ОУ подается управляющее $U(t)$ и возмущающее (помеха) $F(t)$, воздействия. Состояние ОУ характеризуется одной или несколькими выходными величинами $x(t)$, которые называются также управляемыми или регулируемыми переменными.

На вход управляющего устройства (УУ) подается задающее воздействие X_3 , содержащее информацию о цели управления, т.е. о требуемом значении $x_{\text{треб}}(t)$, и информация о текущем состоянии ОУ $x_{\text{тек}}(t)$.

В состав управляющего устройства входят вычислительное устройство и исполнительное устройство.

Вычислительное устройство (сумматор) (ВУ) служит для измерения подаваемых на УУ воздействий и сигналов $x(t)$, X_3 , $F(t)$ и реализует алгоритм работы УУ.

Исполнительное устройство (ИУ) служит для непосредственного управления УУ, для изменения его состояния в соответствии с сигналами, выдаваемыми ВУ.

В учебном пособии рассматриваются измерительно-преобразовательные элементы (датчики), служащие для получения первичной информации о состоянии объекта управления, построенные на различных физических принципах.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ

1.1 Классификация датчиков

Любая автоматическая система управления и контроля содержит в качестве функционально необходимых элементов один или несколько измерительных преобразователей (или датчиков), служащих для измерения действительного значения управляемой или контролируемой (входной) величины и преобразования этого значения в сигнал для дальнейшей передачи по каналам управления.

По природе выходной величины все датчики можно подразделить на электрические, гидравлические, пневматические.

По природе измеряемой (преобразуемой) входной величины выделяют: датчики перемещения, температуры, уровня, расхода, положения, скорости, ускорения, давления (или усилия), частоты, светового потока, деформации.

По виду выходной величины электрические датчики подразделяют на:

– параметрические (пассивные): контролируемая величина преобразуется в изменение таких параметров как электрическое сопротивление, индуктивность, емкость (индуктивный, емкостной датчик, фоторезистор, угольный столбик);

– генераторные (активные): контролируемая величина преобразуется в изменение заряда, напряжения, тока (термопара, фотоэлемент, пьезодатчик).

По принципу действия выделяют:

– датчики сопротивления: потенциометры, тензорезисторы, терморезисторы, фоторезисторы;

– датчики индуктивности и взаимной индуктивности: индуктивные, сельсины, микросины, вращающиеся трансформаторы;

– магнитно индукционные: тахогенераторы постоянного и переменного тока, емкостные датчики.

По структуре:

– с промежуточным преобразованием энергии;

– с непосредственным преобразованием энергии.

1.2 Основные характеристики датчиков

Входная величина – величина, воспринимаемая и преобразуемая датчиком. Бывает энергетической и параметрической.

Выходной сигнал – это определенное изменение несущей величины (ток, напряжение, мощность), вызванное изменением входной величины и используемое для передачи информации. Существуют две формы сигнала: непрерывная в виде физического процесса (электромагнитного) и дискретная кодированная.

Изменение несущей величины (модуляция) может осуществляться по амплитуде, по временному признаку (изменение частоты, длительности воздействия, порядка чередования воздействия), по пространственному признаку (чередование сигналов в каналах связи).

Статическая характеристика датчика $y=F(x)$ описывает физические законы, положенные в основу работы датчика, и представляет собой зависимость выходного сигнала датчика y от входной величины x при медленном их изменении в установившемся режиме.

Для удобства измерений датчики изготавливают таким образом, чтобы статическая характеристика была линейной.

Чувствительность датчика S представляет собой отношение весьма малого изменения выходной величины к весьма малому изменению входной в установившемся режиме

$$S = \frac{dy}{dx} = \frac{\Delta y}{\Delta x}.$$

При $S=\infty$ статическая характеристика принимает релейный характер.

Порог чувствительности – это минимальное изменение входной величины, вызывающее изменение выходного сигнала.

Гистерезис – это неоднозначность хода статической характеристики при увеличении и уменьшении входной величины.

Основная погрешность – отклонение реальной статической характеристики (нагрузочной) от желаемой.

Дополнительная погрешность вызывается изменениями внешних условий по сравнению с их нормальным значением.

Максимальная мощность входных и выходных сигналов, потребляемая мощность и КПД.

Динамические характеристики определяют поведение датчика при быстрых изменениях входной величины (передаточная функция, переходная характеристика, амплитудно-частотная и фазовая).

Метрологические характеристики имеют большое значение при оценке качества и свойств датчика (класс точности, допускаемая погрешность).

Требования к датчикам

К основным требованиям, предъявляемым к датчикам систем управления, относятся: высокая динамическая точность – минимальное искажение формируемого сигнала; высокая статическая точность; высокая надёжность в условиях, определённых техническими требованиями; допустимые габариты и масса; достаточно высокий коэффициент преобразования (чувствительность); достаточно высокая мощность выходного сигнала.

2. ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

2.1. Линейные реостатные измерительные преобразователи

Линейные реостатные измерительные преобразователи предназначены для измерения линейного или углового механического перемещения и преобразования его в электрический сигнал и представляют собой проводочные реостаты с непрерывной или секционированной намоткой. В первом случае подвижная часть датчика, определяющая перемещение, – движок – скользит непосредственно по обнаженной от изоляции поверхности провода, во втором – по контактам, к которым присоединены концы и начала соседних секций реостата. Датчики работают на постоянном и на переменном токе. Движок механически связан с каким-либо устройством (клапаном, рулем, режущим инструментом и т.д.)

На рис. 2.1 представлены конструктивные схемы одноконтурных линейных реостатных датчиков (для измерения линейных и угловых перемещений). На рис. 2.2 представлены схема включения и статические характеристики одноконтурного реостатного датчика (1 – идеальная (режим холостого хода); 2,3 – реальные (нагрузочные)). На рис. 2.3 – статическая характеристика с учетом ошибки ступенчатости.

Величина выходного напряжения реостатного датчика зависит от положения токосъёмного контакта, то есть от величины его перемещения из положения, принятого за начало отсчета.

Основные конструктивные элементы датчика: плоский, цилиндрический или кольцевой каркас из изоляционного материала (текстолита, гетинакса, керамики или металла, покрытого слоем изоляции); обмотка из высокоомного материала, стойкого к истиранию (манганин, константан, сплав серебра с палладием, платины с иридием, вольфрам), диаметром от 0,03 до 0,01 мм для датчиков высокого класса точности; для датчиков низкого класса точности – диаметром до 0,4 мм); подвижный токосъёмный контакт.

Металлические каркасы вследствие лучшей теплопроводности допускают большие удельные нагрузки. Часто для этой цели применяют оксидированный алюминий. Толщина нанесенного оксидного слоя должна быть порядка 10 мкм, слой не должен иметь трещин. Напряжение пробоя такого слоя порядка 500 В. Допустимое превышение температуры 50 °С.

Провод наматывается в один слой с некоторым натяжением, величина которого p выбирается в зависимости от материала и диаметра провода. При этом необходимо, чтобы при понижении температуры провод не рвался, так как обычно коэффициент линейного расширения материала корпуса не равен коэффициенту линейного расширения материала провода; чтобы при нагреве корпуса напряжения в проводе при растяжении не достигали значений, равных пределу упругости. Толщину каркаса не рекомендуется брать менее $4d$, а радиус закругления B на углах – менее $2d$.

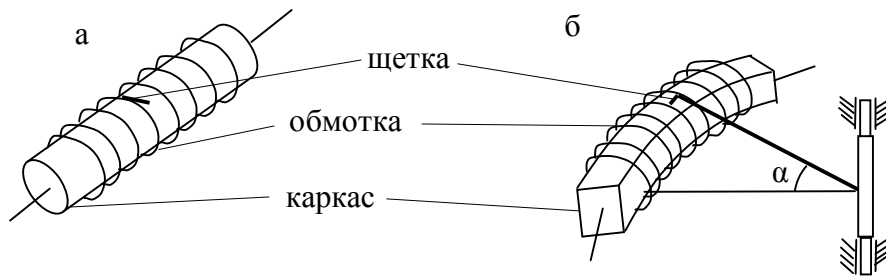


Рис. 2.1. Конструктивные схемы линейных реостатных датчиков:
 а – для измерения линейных перемещений;
 б – для измерения угловых перемещений

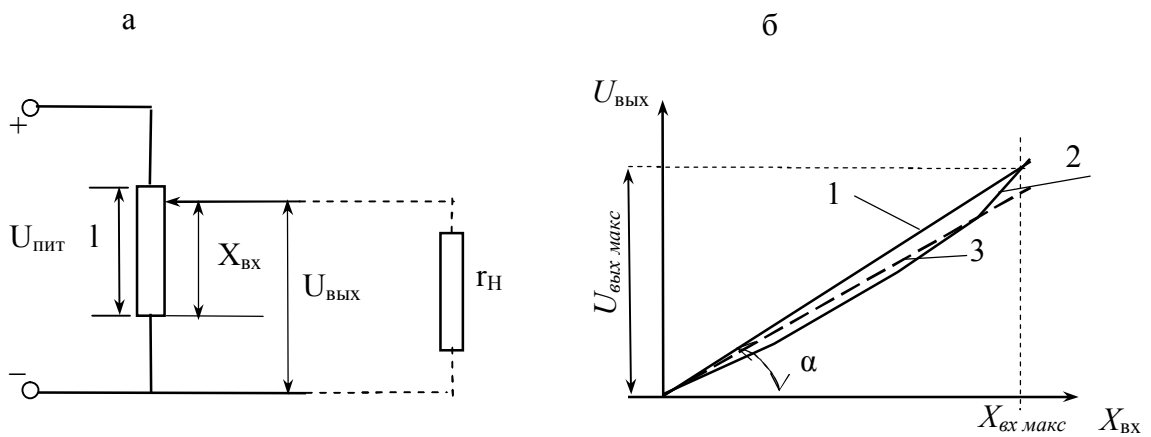


Рис. 2.2. Схема включения (а) и статические характеристики (б)
 однотактного реостатного датчика перемещений:
 1 – идеальная; 2 – нагрузочная; 3 – нагрузочная линеаризованная

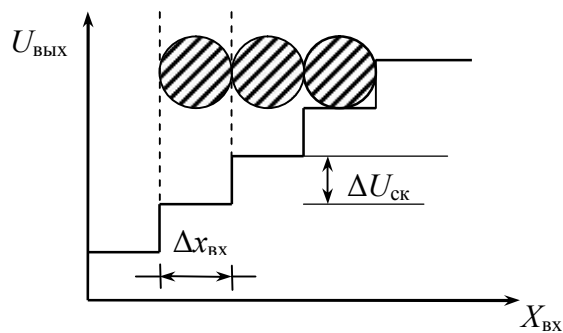


Рис. 2.3. Статическая характеристика однотактного
 реостатного датчика перемещений с учетом ошибки ступенчатости

Поверхность провода должна быть покрыта эмалью или слоем окислов для изоляции соседних проводников друг от друга. После намотки провода для укрепления витков и предохранения их от смещения всю поверхность покрывают тонким равномерным слоем лака (бакелитовый лак).

Полировка контактной поверхности производится вдоль витков наждачной или полировочной бумагой, сухим оселком, шлифовальным кругом с алмазной пылью или (в случае эмали) фетровым кругом. Ширина контактной поверхности $b = (2 \div 3)d$.

Ползунок (движок) чаще изготавливается из платины с иридием, иногда из платины с бериллием (0,05%) или платины с серебром (в виде двух-трех параллельных проводов, диаметр и длина которых выбираются такими, чтобы обеспечить контактное усилие $F_k = 0,1 \div 1,0$ Н). В более грубых датчиках ($d > 0,1$ мм) ползунки выполняются в виде пластинчатых щеток из серебра, серебра с палладием. Контактное усилие F_k выбирается равным $5 \div 10$ Н.

Надежность контакта обеспечивают применением высокого качества материалов, чистотой контактных поверхностей, защитой от загрязнений, достаточным контактным давлением, стойкостью материалов против истирания.

Большинство реостатных измерительных преобразователей имеют равномерную намотку, поэтому их статическая характеристика близка к линейной:

$$U_{\text{вых}} = k \cdot X_{\text{вх}} - \text{для датчиков линейных перемещений};$$

$$U_{\text{вых}} = k \cdot \varphi - \text{для датчиков угловых перемещений}.$$

Статическая характеристика в режиме холостого хода имеет вид

$$U_{\text{вых0}} = k_0 \cdot X_{\text{вх}},$$

где k_0 – статическая чувствительность датчика, $k_0 = tg \alpha$.

Порог чувствительности $\Delta x_{\text{порог}}$ определяется ошибкой ступенчатости на статической характеристике и обусловлен скачком напряжения $\Delta U_{\text{ск}}$ при переходе ползунка с одного витка на другой.

Величина скачка напряжения определяется

$$\Delta U_{\text{ск}} = U_{\text{пит}} / W,$$

где W – число витков намотки.

Порог чувствительности

$$\Delta x_{\text{порог}} = l / W,$$

где l – длина намотки по каркасу.

Входное усилие на ползунке зависит от силы нажатия ползунка на намотку (контактное усиление) и от коэффициента трения.

Мощность сигнала на выходе:

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{н}} = U_{\text{вых}}^2 / R_{\text{н}}.$$

Потребляемая мощность:

$$P_{\text{потр}} = U_{\text{пит}}^2 / R_{\text{обм}}.$$

В САР используют мостовые схемы включения реостатных датчиков (рис. 2.4 – с одним ползунком, с двумя ползунками). Входное перемещение отсчитывается от нейтрали (вверх – положительное, вниз – отрицательное). В схемах на рис. 2.4в, г ползунки механически заблокированы и перемещаются от нейтрали на $X_{\text{вх}}$, но в противоположные стороны. При изменении знака $X_{\text{вх}}$ (то есть при переходе значения $X_{\text{вх}} = 0$) изменяется полярность выходного напряжения, а при питании переменным током фаза выходного напряжения изменяется на 180° по отношению к фазе напряжения источника питания. Чувствительность схем с двумя ползунками выше в 2 раза.

На рис. 2.5 представлены статические характеристики двухтактных реостатных датчиков.

Динамические свойства реостатных датчиков

При чисто активной нагрузке реостатный датчик можно рассматривать как безынерционное усилительное звено, то есть его передаточная функция имеет вид

$$W(p) = k.$$

При индуктивной нагрузке с наличием активной составляющей реостатный датчик можно рассматривать как инерционное звено первого порядка. Передаточная функция реостатного датчика в этом случае имеет вид

$$W(p) = k / (Tp + 1).$$

Преимущества и недостатки реостатных датчиков перемещения

К преимуществам относятся простота конструкции; возможность получения линейной статической характеристики с высокой точностью; стабильность характеристик; возможность работы на постоянном или переменном токах; малые переходные сопротивления; низкий температурный коэффициент сопротивления.

К недостаткам – возможность отказов из-за наличия скользящего подвижного контакта (окисление, стирание контактной дорожки); сравнительно небольшой коэффициент преобразования и высокий порог чувствительности $\Delta X_{\text{пор}} > D_{\text{пров}}$; наличие шумов; подверженность электроэрозии под действием импульсных разрядов; ограниченное использование при переменном токе повышенной частоты (до 1 кГц); ограниченность скорости перемещения; низкая износостойчивость.

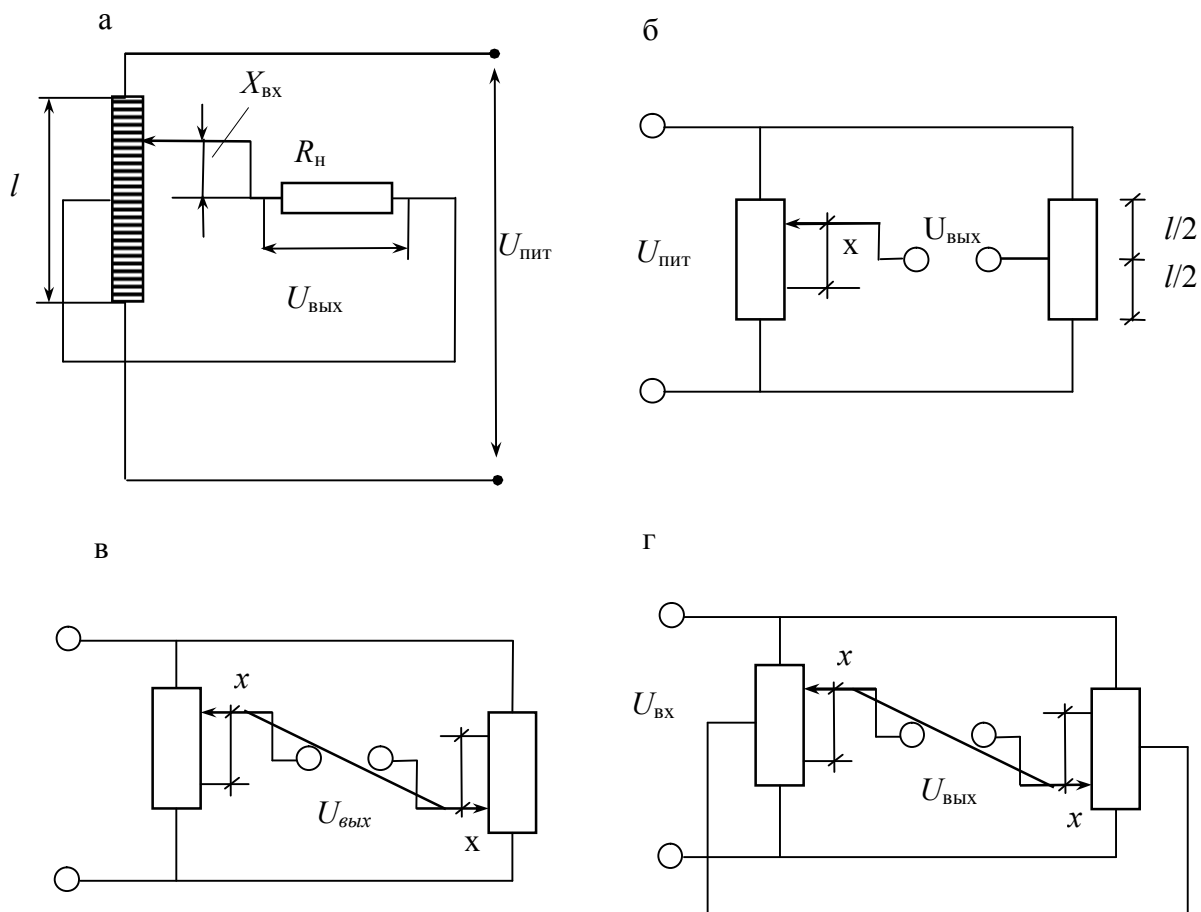


Рис. 2.4. Схемы включения двухтактных реостатных датчиков перемещения:
а, б – с одним ползунком, в, г – с двумя ползунками

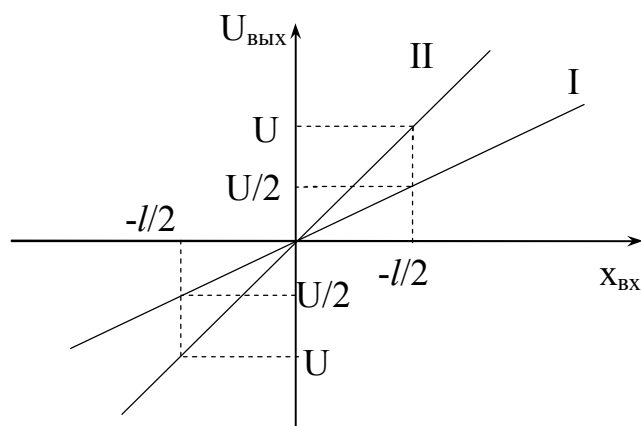


Рис. 2.5. Статические характеристики двухтактных реостатных датчиков:
кривая I – для схемы на рис. 2.4а, б; кривая II – для схем на рис. 2.4в, г

Погрешности реостатных датчиков и причины, их вызывающие:

– при некоторых незначительных перемещениях ползунка выходное напряжение не изменяется, то есть на статической характеристике возникает зона нечувствительности Δx ;

– неравномерность статической характеристики ($\Delta U_{\text{ск}}$ и Δx) обусловлена непостоянством диаметра провода по его длине, а значит, и удельного сопротивления и шага намотки;

– погрешности от люфта (между осью вращения двигателя и направляющей втулкой);

– погрешности от трения (щетке о намотку), что вызывает необходимость регулирования нажатия щётки;

– погрешности от нагрузки (активная нагрузка создает дополнительную неравномерность статической характеристики).

Для преодоления отмеченных недостатков проволочных реостатных датчиков используют:

1) непроволочные потенциометры с резистивными элементами на основе проводящей пластмассы: отличаются высокой разрешающей способностью, низким уровнем шумов, возможностью работы на высоких скоростях перемещения токосъёмника и высоких частотах;

2) фотоэлектрические и магниторезистивные потенциометры: отличаются повышенной износоустойчивостью, высокой надёжностью и скоростью регулирования выходного сигнала (но и высоким переходным сопротивлением);

3) жидкостные потенциометры, резистивные элементы которых получают спеканием смеси стекла с порошком окиси палладия, серебра или золота с органическим пластификатором;

4) потенциометры на эффекте Холла, МДП-структурах (металл, диэлектрик, полупроводник), на различных электрохимических явлениях.

2.2. Функциональные (нелинейные) реостатные датчики

В счётно-решающих устройствах используются нелинейные датчики, в которых связь между входной и выходной величинами может быть описана зависимостями вида

$$U_{\text{вых}} = \{kx^2, k \ln x, k \sin x, kx^{1/2}, \dots\}.$$

Заданная форма статической характеристики достигается: изменением диаметра проволоки вдоль намотки; изменением шага намотки; применением каркаса сложного профиля; шунтированием участков линейных потенциометров, сопротивлениями различной величины.

Конструктивные схемы функциональных реостатных датчиков приведены на рис. 2.6.

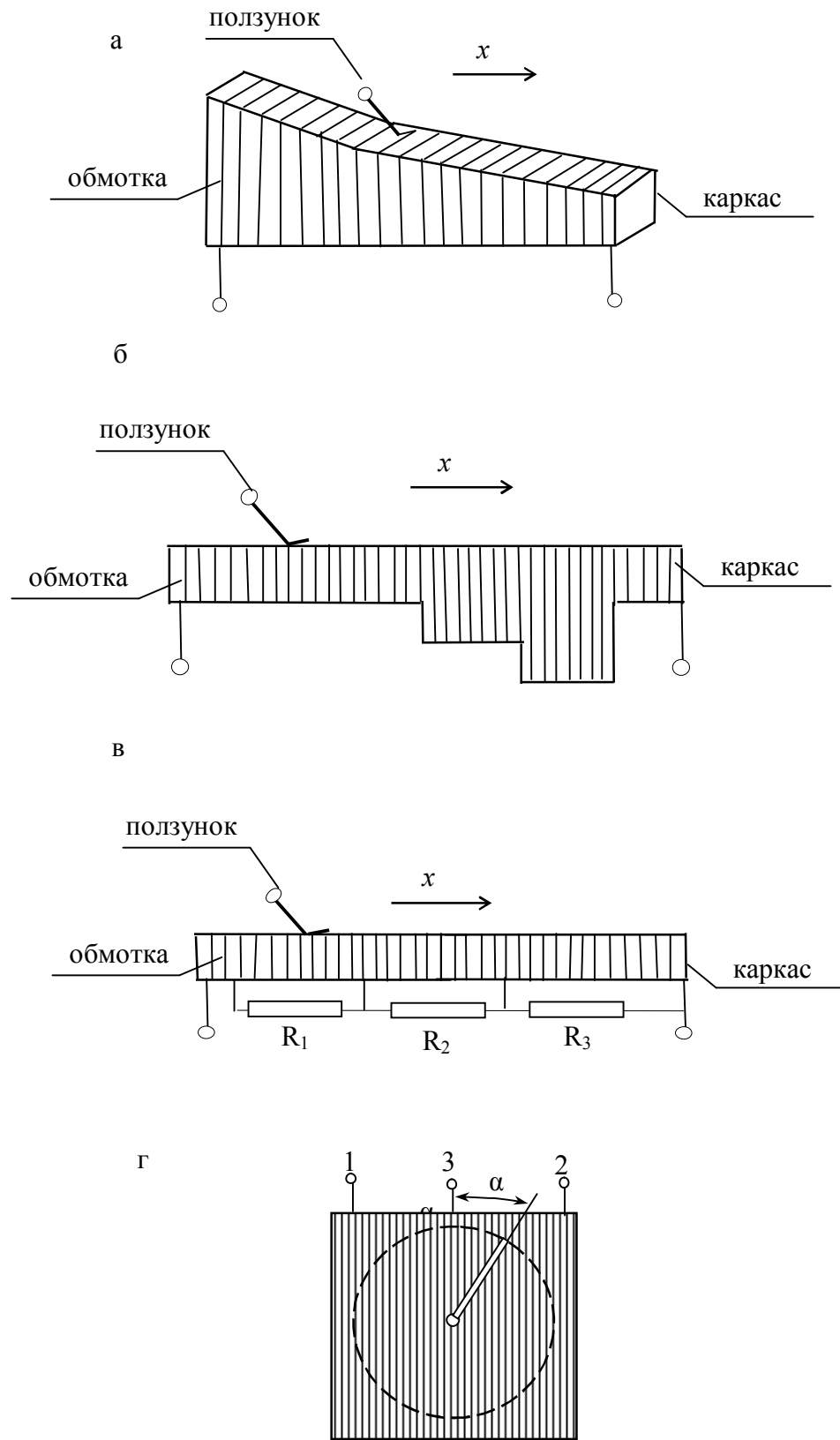


Рис. 2.6. Конструктивные схемы функциональных реостатных датчиков:
 а) с профилированным каркасом; б) со ступенчатым каркасом;
 в) с зашунтированными секциями; г) синус-косинусный

2.3. Расчет реостатных датчиков перемещений

Расчет включает построение статической характеристики и определение допустимой температуры нагрева обмотки.

Расчет реостатных датчиков линейных перемещений

Реверсивная схема включения потенциометра представлена на рис. 2.4.

Этапы расчета

1. Составляют эквивалентную схему включения потенциометра, полагая потенциометр линейным.

2. Находят общее сопротивление цепи r_0 относительно входных зажимов; общий ток цепи; выходное напряжение (статическую характеристику):

$$U_{\text{вых}} = I_{\text{вых}} \frac{\frac{r_0 X_{\text{ex}}}{l} R_n}{\frac{r_0 X_{\text{ex}}}{l} + R_n} = \frac{UI R_n X_{\text{ex}}}{R_n l^2 + r_0 (l - X_{\text{ex}}) X_{\text{ex}}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{вых}}$ – общий ток цепи, А;

r_0 – сопротивление обмотки датчика, Ом;

X_{ex} – перемещение ползунка, м;

R_n – сопротивление нагрузки, Ом;

l – длина обмотки по каркасу, м;

U – напряжение питания, В.

При $R_n \gg r_0$ и $l^2 \gg \frac{r_0 X_{\text{ex}}}{R_n} (l - X_{\text{ex}})$ выражение статической характеристики (1) имеет вид

$$U_{\text{вых}} = \frac{U}{l X_{\text{ex}}}, \quad (2)$$

где $K_0 = \frac{U}{l}$ – статическая чувствительность датчика (3÷5 В/мм).

3. Определяют допустимую температуру нагрева обмотки из условия механической прочности провода:

$$\Theta_{10} = \frac{\sigma_y}{E(\alpha_k - \alpha_{np})} + \Theta_{20}, \quad (3)$$

где Θ_{10} – верхний предел температуры нагрева корпуса при максимальной температуре окружающей среды, °С;

σ_y – допустимое напряжение в проводе при растяжении, Па;
 E – модуль упругости материала провода, Па;
 α_k – коэффициент линейного расширения материала каркаса;
 $\alpha_{пр}$ – коэффициент линейного расширения материала провода;
 Θ_{20} – нижний предел температуры корпуса, обусловленный минимальной температурой окружающей среды, °С

4) определяют допустимую температуру нагрева обмотки из условия механической прочности провода:

$$\Theta_{10} = \frac{\sigma_y}{E(\alpha_k - \alpha_{пр})} + \Theta_{20}, \quad (4)$$

где Θ_{10} – верхний предел температуры нагрева корпуса при максимальной температуре окружающей среды; °С;

σ_y – допустимое напряжение в проводе при растяжении, Па;
 E – модуль упругости материала провода, Па;
 α_k – коэффициент линейного расширения материала каркаса,
 $\alpha_{пр}$ – коэффициент линейного расширения материала провода;
 Θ_{20} – нижний предел температуры корпуса, обусловленный минимальной температурой окружающей среды, °С

4. Определяют диаметр провода обмотки d из уравнения теплового баланса:

$$d = \sqrt{\frac{4\rho I_{дон}^2}{k\pi^2\eta\Delta\Theta}}, \quad (5)$$

где ρ – удельное сопротивление материала провода, Ом·м;

$I_{дон}$ – максимально допустимый ток, А;

k – коэффициент, учитывающий, что часть обмотки прилегает к каркасу (не охлаждается), $1 > k > 0,5$;

η – коэффициент теплоотдачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}$;

$\Delta\Theta$ – перегрев относительно окружающей среды:

$$\Delta\Theta = \Theta_{10} - \Theta_{0\max};$$

$\Theta_{0\max}$ – максимальная температура окружающей среды.

Также определяют среднюю длину витка обмотки и диаметр каркаса.

Расчет реостатных датчиков угловых перемещений

При условии, что величина сопротивления нагрузки R_n много больше сопротивления датчика r_0 , определяют:

1. Требуемую величину питающего напряжения:

$$U = 3kL_{ex\ max} , \quad (6)$$

где k – чувствительность датчика, В/мм;

$L_{ex\ max}$ – максимально возможное перемещение ползунка, мм.

2. Радиус дуги каркаса r (задавшись материалом контактной поверхности ползунка):

$$r = \frac{M_{ex}}{F_n} = \frac{M_{ex}}{\mu F} , \quad (7)$$

где M_{ex} – допустимый входной момент, Нм;

F_n – усилие, требуемое для перемещения ползунка, Н;

μ – коэффициент трения;

F – контактное давление, Па.

3. Длину дуги каркаса:

$$L_{\kappa} = 3L_{ex\ max} r . \quad (8)$$

4. Диаметр провода (из уравнения теплового баланса, задавшись допустимым значением перегрева относительно окружающей среды и размерами каркаса b и h):

$$d = \sqrt[3]{\frac{(h + b)^2 \rho \eta L_{\kappa} M_{ex} \Delta \Theta}{0,6k^2 L_{ex\ max} F \mu}} . \quad (9)$$

Материалы проводов и их характеристики приведены в таблице А приложения.

2.4. Индуктивные датчики перемещений

Однотактный индуктивный датчик

Однотактные индуктивные датчики предназначены для измерения сравнительно малых угловых или линейных механических перемещений (от доли микрометра до 5 мм) и для преобразования их в электрические сигналы переменного тока.

На рис. 2.7а представлена схема включения однотактного индуктивного датчика с плоскопараллельным воздушным зазором: сердечник 1 и якорь 3 выполнен из шихтованного магнитомягкого материала; 2 – медная обмотка. Частота переменного тока 50 Гц (до нескольких кГц).

Принцип действия датчика - при изменении воздушного зазора δ изменяются индуктивность дросселя и полное сопротивление рабочей цепи, следовательно, изменяется падение напряжения на нагрузке $U_{вых}$ и ток цепи.

Статическая характеристика индуктивного датчика при активно-индуктивной нагрузке определяется выражением

$$I_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{\sqrt{(R_n + r_{\text{оп}})^2 + \omega^2 \left(\frac{W^2 S_v \mu_0}{2\delta}\right)^2}}, \quad (10)$$

где $U_{\text{вых}}$ – падение напряжения на нагрузке, В;

R_n – сопротивление нагрузки, Ом;

$r_{\text{оп}}$ – сопротивление обмотки датчика, Ом;

ω – круговая частота напряжения сети, с^{-1} ;

W – число витков обмотки;

S_v – площадь сечения воздушного зазора, м^2 ;

μ_0 – магнитная постоянная, $4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м;

δ – величина воздушного зазора, м.

Графически статическая характеристика индуктивного датчика представлена на рис. 2.7б.

Идеальная статическая характеристика однотактного индуктивного датчика имеет место при принятии двух допущений:

1) активное сопротивление цепи R много меньше индуктивного сопротивления X_L , поэтому им пренебрегают;

2) магнитное сопротивление стальных частей $R_{\text{м ст}}$ много меньше магнитного сопротивления воздушного зазора $R_{\text{м в}}$, поэтому им тоже пренебрегают.

На рис. 2.7 представлены схемы однотактных индуктивных датчиков.

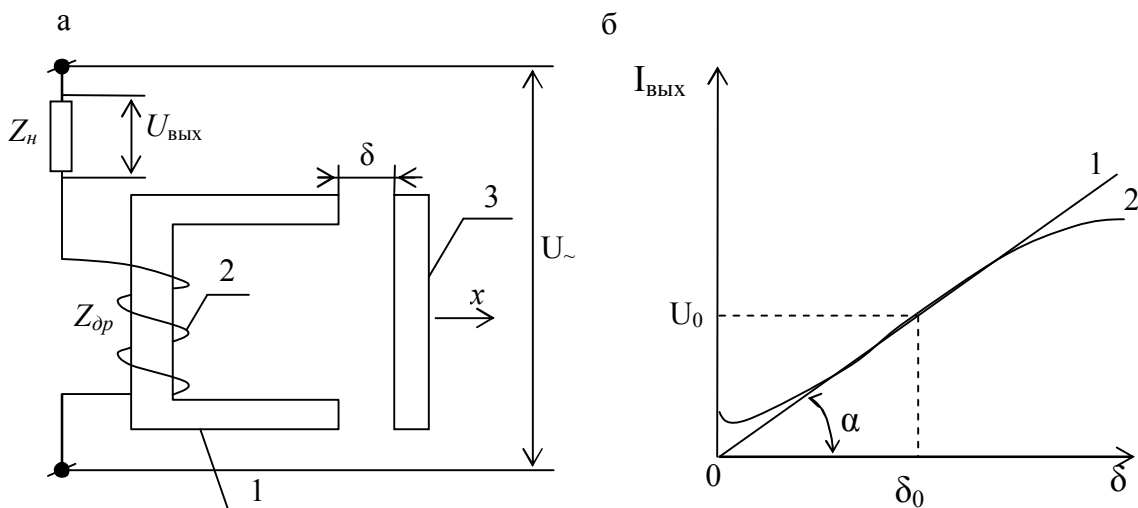


Рис. 2.7. Схема включения (а) и статические характеристики (б) однотактного индуктивного датчика с плоскопараллельным воздушным зазором: 1 – идеальная (холостой ход); 2 – реальная (нагрузочная)

На рис. 2.8 представлены конструктивные схемы наиболее распространенных индуктивных преобразователей.

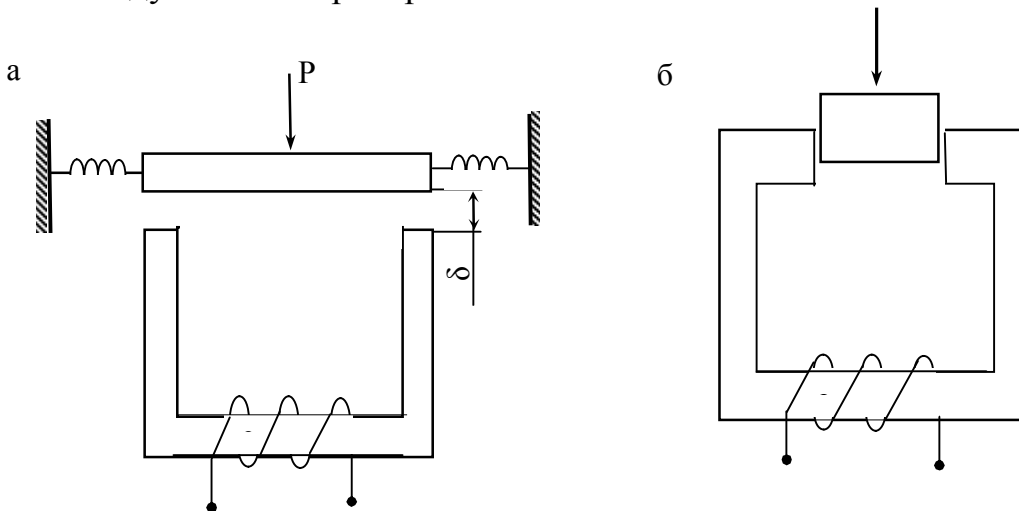


Рис. 2.8. Конструктивные схемы индуктивных преобразователей:
 а) с малым воздушным зазором, изменяющимся под действием механической величины (сосредоточенной силы, давления, линейного перемещения);
 б) с изменяющейся площадью воздушного зазора

Угол наклона статической характеристики к горизонтальной оси

$$\alpha = \arctg(k), \quad (11)$$

где k – чувствительность датчика, определяемая $k = \frac{2U}{\mu_0 S_g W^2 \omega}$.

Отклонение реальной статической характеристики от идеальной при малых величинах воздушного зазора δ объясняется тем, что условие $R_{м ст} \ll R_{м в}$ вносит погрешность, так как эти величины соизмеримы при малых δ . При больших значениях δ допущение $R \ll X_L$ также вносит погрешность, так как активное сопротивление цепи $R_n + r_{оп}$ соизмеримо с индуктивным $\omega(L_n + L_{оп})$.

Недостатки одноктных индуктивных датчиков:

- 1) фаза выхода сигнала не зависит от направления перемещения якоря; наличие тока холостого хода;
- 2) большое значение входных усилий, уравновешивающих тяговое усилие электромагнита.

Увеличение напряжения питания датчика ведёт к увеличению чувствительности, но требует увеличения габаритов и массы датчика.

Величина напряжения питания индуктивного датчика, определяемая по формуле $U = 4,44 B_m S_{ст} W f$, ограничивается двумя факторами:

– допустимой температурой перегрева датчика, определяемой из уравнения теплового баланса:

$$I^2 r_{\partial p} + P_m \leq \eta S_{\text{охл}} (\Theta_{10} - \Theta_0);$$

– допустимой величиной магнитной индукции B_M в стальных частях магнитопровода ($B_M = 0,4 \div 1,0$ Тл).

Двухтактные индуктивные датчики

Существуют 2 основные схемы включения двухтактных индуктивных датчиков: дифференциальная и мостовая (рис. 2.9, 2.10).

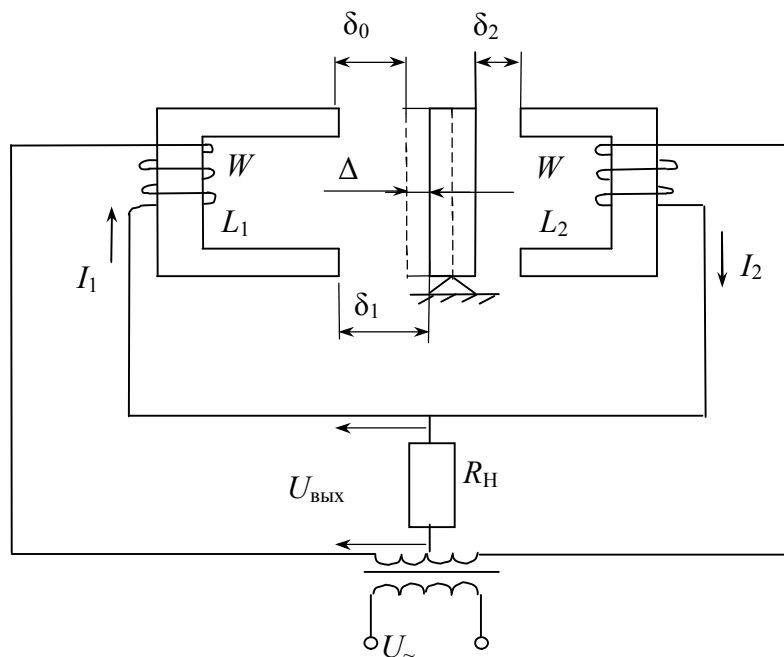


Рис. 2.9. Дифференциальная схема включения индуктивных датчиков

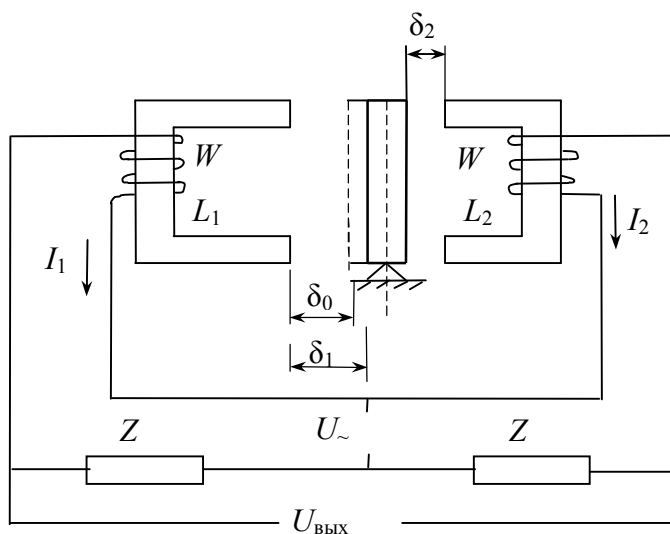


Рис. 2.10. Мостовая схема включения индуктивных датчиков

Дифференциальная схема включения индуктивных датчиков предполагает наличие трансформатора со средней точкой (см. рис. 2.9). Обе обмотки имеют одинаковое число витков, сердечники идентичны по характеристикам. Сопротивление нагрузки включается между средней точкой обмотки трансформатора и средней точкой обмоток измерительного преобразователя. Ток, протекающий через нагрузку, равен разности токов правой и левой половин схемы:

$$I_{\text{вых}} = I_1 - I_2.$$

Выходное напряжение

$$U_{\text{вых}} = (I_1 - I_2) R_H.$$

В исходном положении при равенстве зазоров $\delta_0 = \delta_1 = \delta_2$ индуктивности обмоток равны $L_1 = L_2 = L_0$. Токи в обоих контурах равны по модулю $|\dot{I}_1| = |\dot{I}_2|$, но противоположны по фазе, следовательно, ток нагрузки равен нулю, значит, и выходное напряжение равно нулю.

При перемещении якоря на величину Δ величины зазоров изменяются: один увеличивается – $\delta_1 = \delta_0 + \Delta$, другой уменьшается – $\delta_2 = \delta_0 - \Delta$. Следовательно, изменяются индуктивности обмоток: $L_1 = L_0 - \Delta L$, $L_2 = L_0 + \Delta L$.

Изменение индуктивностей приводит к нарушению баланса токов: $I_1 = I_0 + \Delta I$; $I_2 = I_0 - \Delta I$. Это приводит к появлению тока в нагрузке и к падению напряжения на нагрузке.

В **мостовой схеме** включения индуктивных датчиков (см. рис. 2.10) рассматривается разность падения напряжения на плечах моста, которая определяет выходное напряжение

$$\dot{U}_{\text{вых}} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \dot{Z}(I_1 - I_2).$$

Принцип действия мостовой схемы аналогичен принципу действия дифференциальной схемы.

Следовательно, статическая характеристика двухтактного индуктивного датчика представляет собой функцию вида $|\dot{U}_{\text{вых}}| = k\Delta$, что соответствует прямой, проходящей через начало координат (рис. 2.11). При изменении знака приращения входной координаты Δ фаза выходного сигнала меняется на 180° .

Мостовая схема при согласованной нагрузке имеет чувствительность меньше в 2,8 раза по сравнению с дифференциальной схемой.

На рис. 2.12 представлены конструктивные схемы индуктивных датчиков для измерения перемещений от 5 мм до 2 м: соленоидный одинарный и ферродинамический.

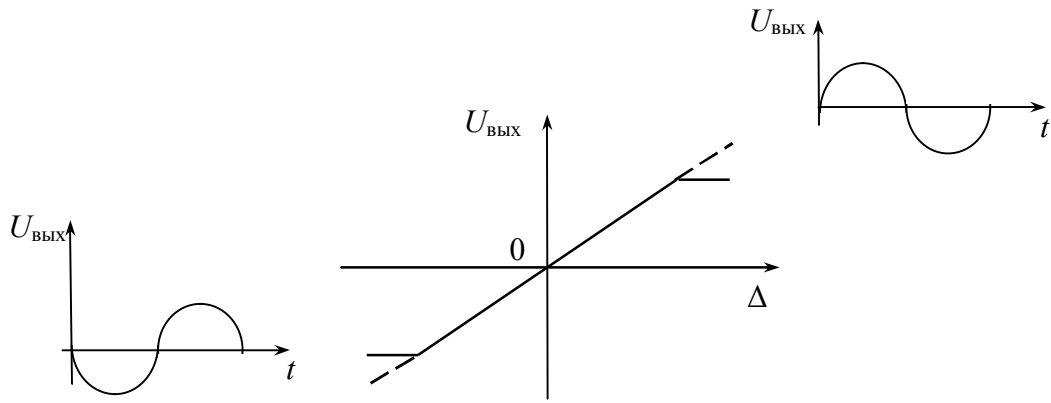


Рис. 2.11. Статическая характеристика двухтактного индуктивного датчика

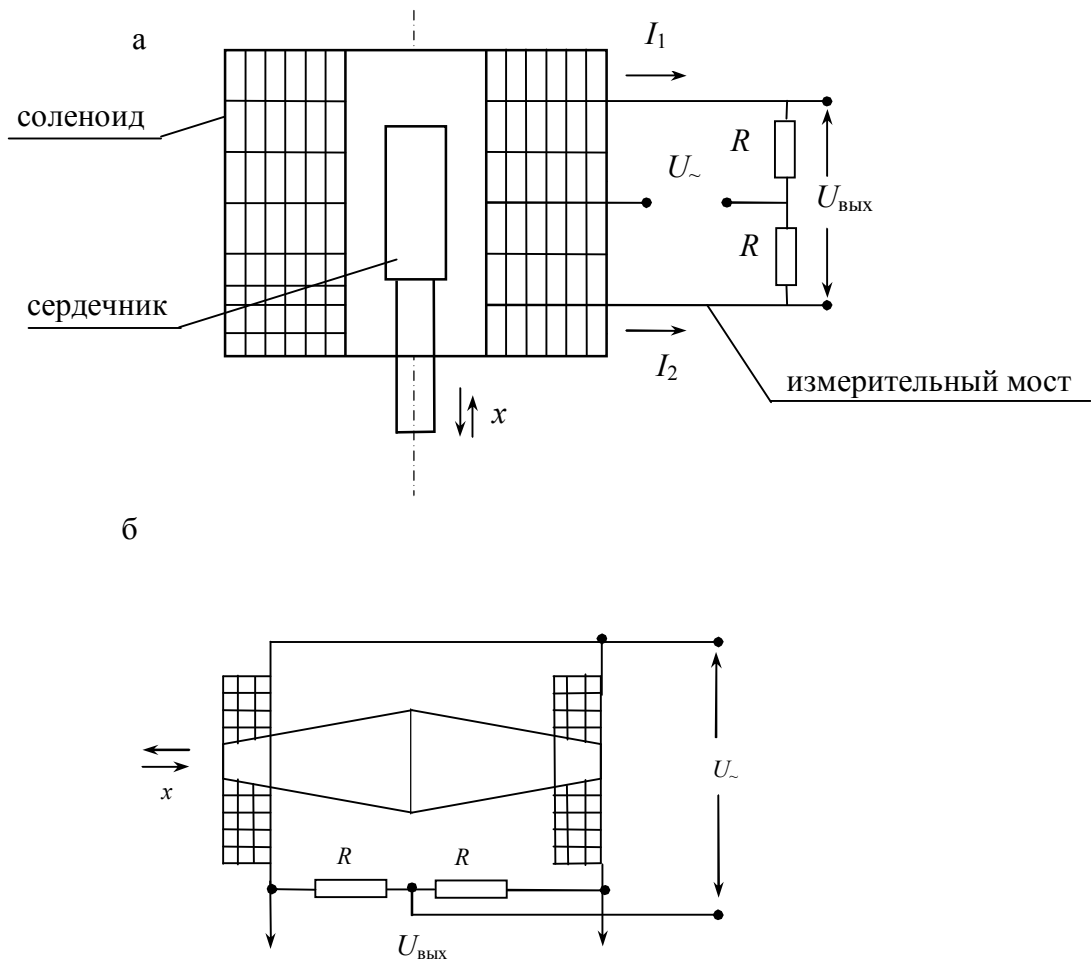


Рис. 2.12. Индуктивные датчики для измерения перемещений от 5 мм до 2 м:
а – соленоидный одинарный; б – ферродинамический

2.5. Расчет индуктивных датчиков линейных перемещений

Расчет индуктивных датчиков линейных перемещений включает следующие этапы:

- 1) расчет и построение статической характеристики – зависимости выходного напряжения от величины воздушного зазора δ ;
- 2) определение перегрева обмотки;
- 3) расчет и построение тяговой характеристики для определения усилий, необходимых для перемещения якоря.

Статическая характеристика индуктивного датчика с плоскопараллельным воздушным зазором описывается (10) или выражением

$$L = \frac{W^2}{R_{m\Sigma} + 2 \frac{\delta_в}{\mu_0 S_в}} = \frac{W^2}{R_{m\Sigma} + 2 \frac{\delta_в}{S_в 4\pi \cdot 10^{-7}}} \approx \frac{4\pi \cdot 10^{-7} W^2}{\frac{2\delta_в}{S_в}} \quad (12)$$

где L – индуктивность дросселя при ненасыщенном магнитопроводе, Гн;

W – число витков обмотки дросселя;

$R_{m\Sigma}$ – магнитное сопротивление стальных частей, Гн⁻¹;

$\delta_в$ – длина воздушного зазора, м;

μ_0 – магнитная постоянная, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

$S_в$ – площадь поперечного сечения воздушного зазора, м².

Магнитное сопротивление воздушного зазора

$$R_{mв} = \frac{2\delta_в}{\mu_0 S_в} = \frac{W^2}{L_x} - \frac{1}{\mu_0} \left[\frac{l_c}{\mu_c S_c} + \frac{l_{як}}{\mu_{як} S_{як}} \right]. \quad (13)$$

Магнитное сопротивление стальных частей

$$R_{m\Sigma} = \frac{1}{\mu_0} \left[\frac{l_c}{\mu_c S_c} + \frac{l_{як}}{\mu_{як} S_{як}} \right], \quad (14)$$

где l_c – средняя длина магнитных силовых линий в сердечнике, м;

S_c – площадь поперечного сечения сердечника, м²,

$l_{як}$ – средняя длина магнитных силовых линий в якоре, м;

$S_{як}$ – площадь поперечного сечения якоря, м²;

μ_c – магнитная проницаемость для материала сердечника при значении магнитной индукции B_{m1} ;

$\mu_{як}$ – то же, для якоря при значении магнитной индукции в якоре B_{m2} .

Значения μ_c и $\mu_{як}$ находят, используя зависимость $B_m = f(H_m)$, которая задается при помощи графиков или таблиц по формуле

$$\mu = \frac{B_m}{H_m \mu_0}. \quad (15)$$

Перегрев обмотки определяется по уравнению теплового баланса:

$$I^2 r_{\partial p} + P_m \leq \eta S_{\text{охл}} \Delta \Theta, \quad (16)$$

где P_m – мощность потерь на вихревые токи и перемагничивание в стальных частях, Вт.

Тяговая характеристика рассчитывается по уравнению Максвелла:

$$F_{\text{Э}} = k_0 U^2 \left(\frac{1}{G_{\text{в}}^2} \cdot \frac{dG_{\text{в}}}{d\delta_{\text{в}}} \right), \quad (17)$$

где $G_{\text{в}} = \frac{\mu_0 S_{\text{в}}}{2\delta_{\text{в}}}$ – магнитная проводимость воздушного зазора.

Для случая, когда $\delta_{\text{в}} = \text{var}$ и имеют место плоские полюсные накопители, то есть $\frac{dG_{\text{в}}}{d\delta_{\text{в}}} = -\frac{\mu_0 S_{\text{в}}}{2\delta_{\text{в}}^2}$, тяговые усилия остаются неизменными при перемещении подвижных частей датчика:

$$F_{\text{Э}} = 2k_0 \frac{U^2}{S_{\text{в}}} = \text{const}. \quad (18)$$

Динамические свойства индуктивных датчиков

Так как входной сигнал индуктивных датчиков имеет более низкую частоту по сравнению с частотой питающего напряжения, изменение амплитуды выходного напряжения определяется уравнением установившегося режима. Поэтому все рассмотренные индуктивные датчики можно считать безынерционными усилительными звеньями с передаточной функцией вида $W(p) = k$.

Преимущества и недостатки индуктивных датчиков

К преимуществам относятся: отсутствие скользящего контакта; высокая чувствительность; высокая разрешающая способность; надежность конструкции; малые габариты и масса при питании напряжением высокой частоты; высокий КПД по сравнению с реостатными датчиками.

К недостаткам – трудность регулирования (трудность получения нулевого значения выходного напряжения при нейтральном положении якоря); возможность работы только на переменном токе; ограниченный диапазон линейности статической характеристики (за счет насыщения магнитопровода); зависимость коэффициента преобразования от частоты и амплитуды питающего напряжения; необходимость экранировки обмотки.

2.6. Трансформаторные датчики

Трансформаторные датчики предназначены для измерения изменения положения объекта, представляющего собой механическое линейное или угловое перемещение малого или большого диапазонов. Принцип действия основан на использовании изменения индуктивной связи (трансформаторной связи) между двумя системами обмоток при перемещении якоря. Одна из обмоток (первичная) питается переменным током, с другой (вторичной) – снимается выходной сигнал (рис. 2.13а). Обмотки взаимозаменяемы.

На рис. 2.13а представлена схема включения трансформаторного датчика для измерения линейного перемещения. Обмотки цепи питания W_1 и W_2 включены встречно и имеют одинаковое число витков. Следовательно, магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 в среднем сердечнике направлены встречно, и выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ определяется их разностью

$$U_{\text{вых}} = 4,44 f W_0 (\Phi_1 - \Phi_2), \quad (19)$$

где f – частота питающего напряжения;

W_0 – число витков обмотки среднего стержня (выходной обмотки).

В нейтральном положении ($\Delta = 0$) площади перекрытия S_1 и S_2 равны, то есть амплитуды магнитных потоков равны ($\Phi_1 = \Phi_2$), и выходное напряжение равно нулю $U_{\text{вых}} = 0$.

При $\Delta \neq 0$ площади перекрытия крайних сердечников изменяются на ΔS . Магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 определяются величиной ΔS , следовательно, $U_{\text{вых}} = k_1 \Delta S$. То есть в рабочем диапазоне статическая характеристика линейна.

На рис. 2.13б представлена схема включения трансформаторного датчика для измерения углового перемещения.

Напряжение вторичной обмотки определяется

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{W_2}{W_1} \cdot \frac{G'_\Pi - G''_\Pi}{G'_\Pi + G''_\Pi}$$

где $G'_\Pi = \frac{G' \cdot G_0}{G' + G_0}$, $G''_\Pi = \frac{G'' \cdot G_0}{G'' + G_0}$,

G_0, G', G'' – магнитные проводимости зазоров.

Магнитная проводимость G_0 не изменяется при перемещении якоря.

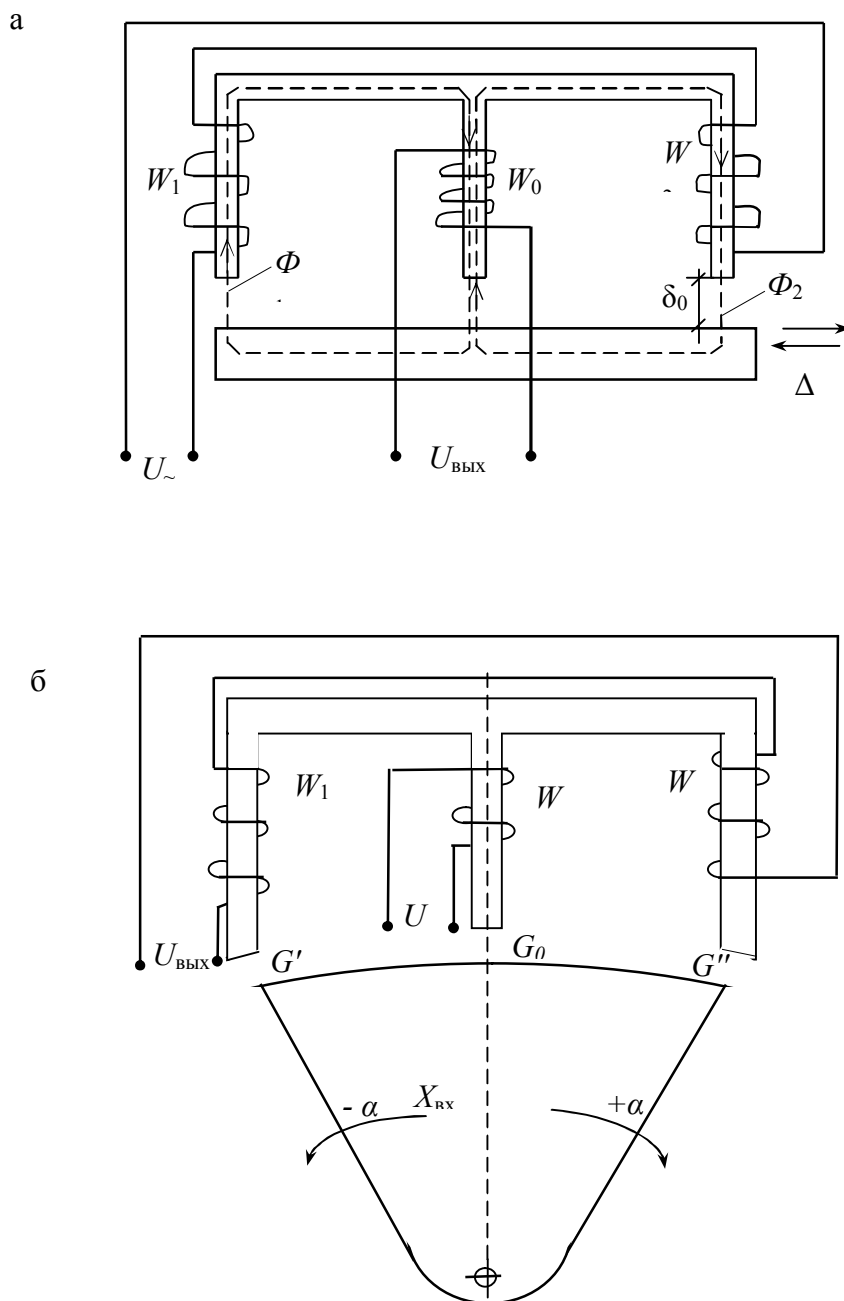


Рис. 2.13. Схемы дифференциальных трансформаторных датчиков:
 а – для измерения линейных перемещений;
 б – для измерения угловых перемещений

Датчики ферродинамического типа и микросины предназначены для бесконтактного измерения угловых перемещений и их преобразования в пропорциональные значения электрического сигнала переменного тока.

На рис. 2.14 представлена конструктивная схема датчика ферродинамического типа. Магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения 4,

индуцирует в обмотке подвижной рамки ЭДС E . Если рамка расположена на нейтрали $N-N$, значение ЭДС равно нулю. Отклонение рамки от нейтрали на угол α , ведет к изменению ЭДС: $E = k\alpha$, где k – коэффициент пропорциональности, значение которого зависит от амплитуды и частоты питающего напряжения, чисел витков обмоток, от свойств и конструкции магнитопровода.

Этот преобразователь обладает свойством реверсивности. При изменении направления поворота рамки, фаза ЭДС в обмотке 3 меняется на 180° . Рабочий угол составляет $\pm 20^\circ$ относительно нейтрали $N-N$.

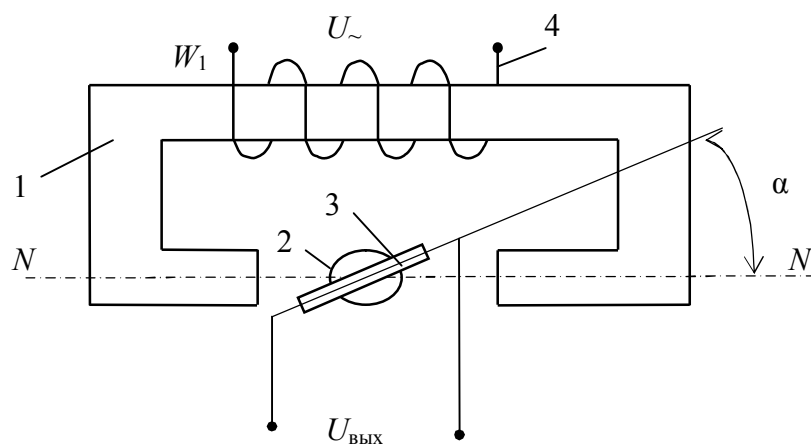


Рис. 2.14. Датчики ферродинамического типа:
1 – ярмо; 2 – сердечник; 3 – обмотка, размещенная на подвижной рамке;
4 – обмотка возбуждения

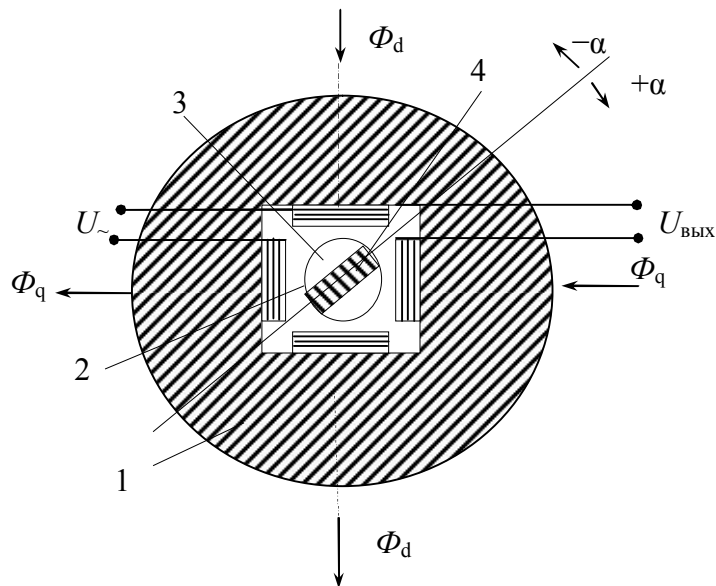


Рис. 2.15. Конструктивная схема микросина:
1 – статор; 2 – ротор; 3 – немагнитная часть ротора;
4 – магнитная часть ротора

На рис. 2.15 приведена конструктивная схема микросина. От трансформаторных датчиков микросин отличается большой надежностью вследствие отсутствия токосъемного контакта, от ферродинамических – большим диапазоном измеряемых углов.

Цепь возбуждения состоит из четырех последовательно соединенных обмоток, расположенных на двух парах взаимно перпендикулярных полюсов статора 1. Катушки выходной обмотки расположены на тех же полюсах статора, соединены последовательно, но встречно.

При подаче питающего переменного напряжения постоянной амплитуды возникают два взаимно перпендикулярных потока возбуждения Φ_d и Φ_q .

В исходном положении (ось ротора располагается под углом 45° к поперечной оси статора $q-q$) амплитуды потоков равны, и суммарная ЭДС, наведенная в выходной обмотке, равна нулю, так как ЭДС, наведенная в вертикальной паре катушек выходной обмотки, направлена встречно ЭДС, наведенной в горизонтальной паре катушек выходной обмотки.

При повороте ротора на угол α один из магнитных потоков возрастает, другой уменьшается, что ведет к появлению результирующей ЭДС в выходной обмотке.

Статическую характеристику микросина можно записать, как $E = k\alpha$ в диапазоне $\pm 45^\circ$. Фаза ЭДС зависит от направления вращения ротора.

2.7. Емкостные датчики перемещений

Емкостные датчики перемещений представляют собой плоские или цилиндрические конденсаторы, в которых изменение расстояния между пластинами, изменение площади перекрытия пластин, или диэлектрической проницаемости вещества между пластинами, преобразуются в изменение емкости.

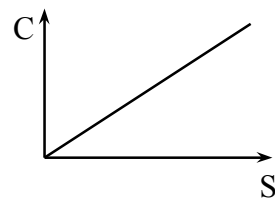
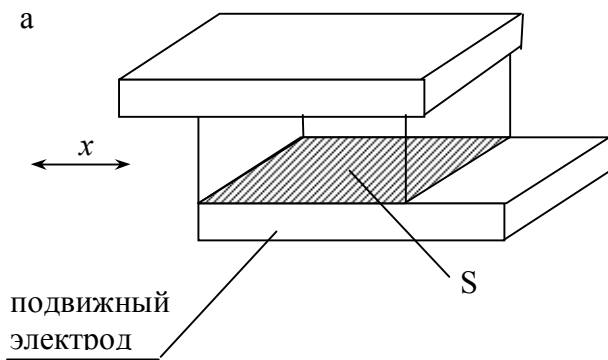
Классификация емкостных датчиков

1) по назначению – датчики линейных и угловых перемещений, уровня, линейных размеров, температуры, усилий;

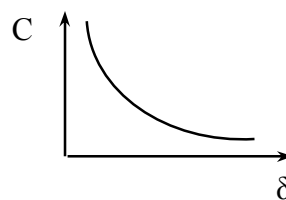
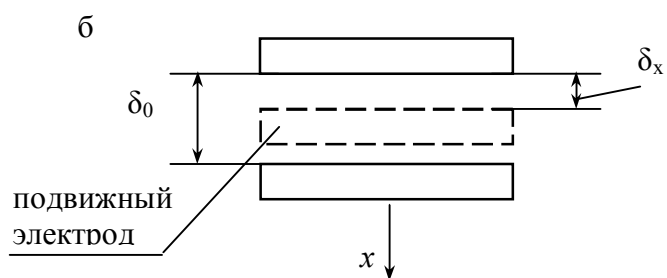
2) по конструкции – с плоскопараллельными пластинами, с цилиндрической формой конденсатора, с наличием диэлектрика между пластинами, без диэлектрика;

3) по виду изменяемого параметра конденсатора – с изменяемой площадью перекрытия пластин (при измерении угловых, линейных перемещений и больших линейных), с изменяемым зазором между пластинами, с изменяемой диэлектрической проницаемостью.

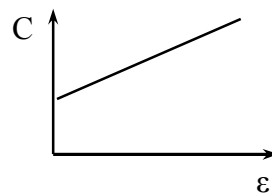
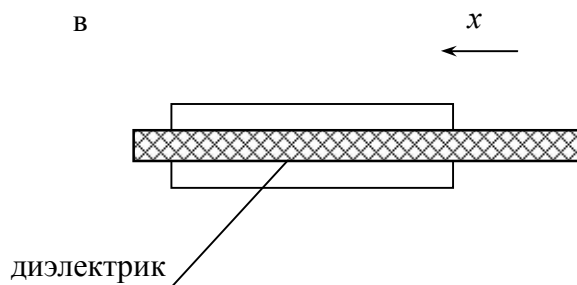
Для измерения угловых механических перемещений и сравнительно больших линейных перемещений в качестве изменяемого параметра используют площадь перекрытия пластин S_x (рис. 2.16а). Статическая характеристика линейна. Когда диапазон контролируемой величины составляет не более 1 мм, в качестве изменяемого параметра выбирают расстояние между пластинами δ_x (рис. 2.16б). Для измерения линейных размеров, концентрации вещества, температуры, усилий используют емкостные датчики с изменением диэлектрической проницаемости ϵ_x вещества между пластинами (рис. 2.16в).



$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_x S}{\delta}$$



$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_x S}{\delta}$$



$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{\delta_x}$$

Рис. 2.16. Виды емкостных датчиков с плоскопараллельными пластинами:
 а – с изменяющейся площадью перекрытия пластин;
 б – с изменяющимся расстоянием между пластинами;
 в – с изменяющейся диэлектрической проницаемостью между пластинами

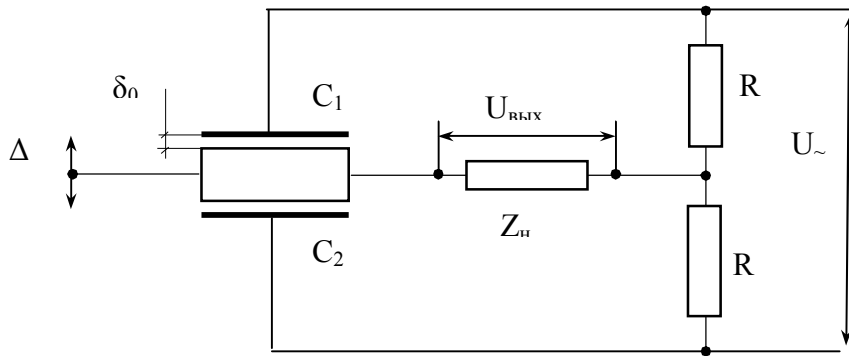


Рис. 2.17. Мостовая схема включения емкостных датчиков с плоскопараллельными пластинами

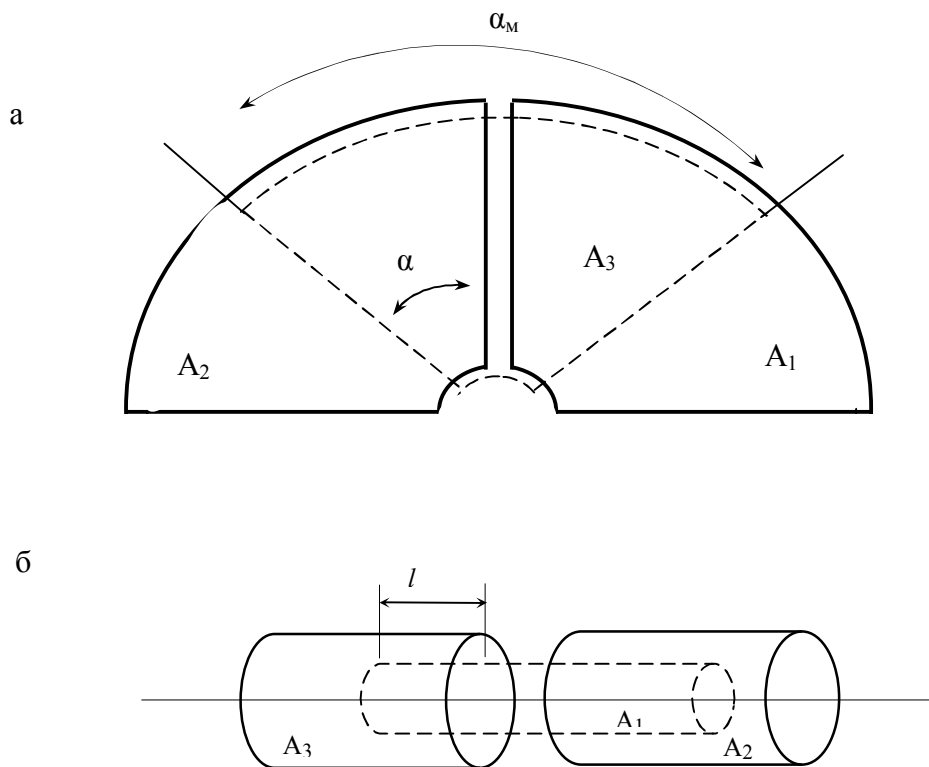


Рис. 2.18. Дифференциальные емкостные датчики
 а) углового перемещения (с переменной площадью пластин);
 б) с цилиндрическими электродами

Для получения реверсивной статической характеристики используют мостовую схему включения емкостных датчиков (рис. 2.17). При $\Delta=0$ емкости плеч схемы C_1 и C_2 равны C_0 , которая определяется величиной δ_0 , и выходное напряжение равно нулю. При $\Delta \neq 0$ происходит изменение емкостей плеч схемы C_1 и C_2 , и амплитуда выходного напряжения мостовой схемы будет линейно зависеть от величины смещения подвижной средней пластины конденсатора Δ . При изменении направления перемещения средней пластины фаза выходного сигнала сдвигается на 180° по отноше-

нию к фазе питающего напряжения. В системах измерения уровня топлива в баках самолетов применяют цилиндрические емкостные датчики, подвижный цилиндрический электрод в которых перемещается относительно двух неподвижных (рис. 2.18).

Преимущества емкостных датчиков – высокая чувствительность; простота конструкции; малые габариты; высокое быстродействие; отсутствие токосъемных контактов. Недостатки – малая выходная площадь; нестабильность характеристики при изменении параметров окружающей среды; влияние паразитных емкостей.

3. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Существуют 2 основные группы датчиков температуры: контактные и бесконтактные. К бесконтактным преобразователям относятся пирометры излучения, действие которого основано на зависимости лучеиспускания нагретых тел от их температуры: яркостные, радиационные, монохроматические, цветовые, оптические и др. Диапазон измерения $100 \div 10000^\circ \text{C}$.

При контактном способе о степени нагретости вещества судят по изменению температурозависимых свойств датчиков, которые предварительно приводятся в состояние теплового равновесия с объектом измерения.

3.1 Термометры расширения

Жидкостные термомеханические преобразователи основаны на тепловом расширении термометрической жидкости. В качестве термометрической жидкости используются: ртуть при изменении температуры до 750°C , подкрашенные спирты – до 100°C .

Конструктивно данные приборы представляют собой стеклянную ампулу и капилляр (рис. 3.1).

Принцип действия – изменение объема термометрической жидкости при изменении температуры преобразуется в изменение высоты столба жидкости в капилляре:

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{S_k},$$

где $\Delta V = V(\beta_t - 3\alpha_t)\Delta t$ – изменение объема термометрической жидкости вследствие расширения при нагревании;

β_t – температурный коэффициент объемного расширения жидкости;

α_t – температурный коэффициент линейного расширения материала капилляра;

Δt – приращение температуры;

S_k – площадь сечения капилляра:

$$S_k = \frac{\pi d_k^2}{4}.$$

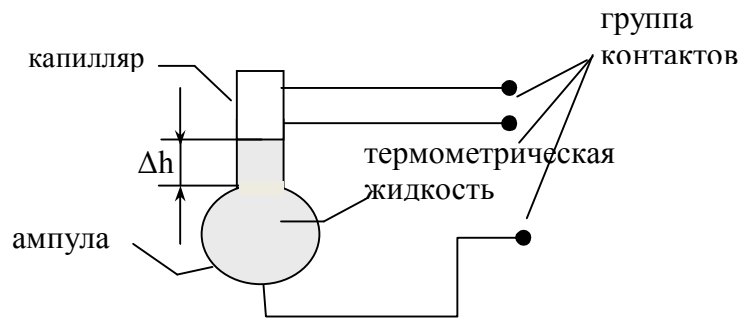


Рис. 3.1. Жидкостные датчики температуры

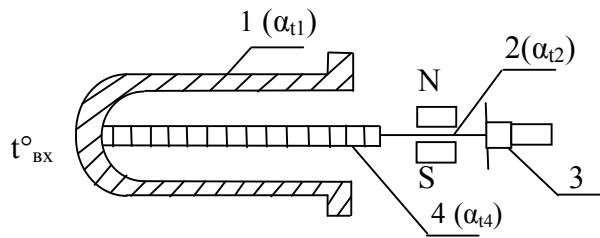


Рис. 3.2. Конструктивная схема dilatометрического преобразователя:
1 – трубка; 2 – струна; 3 – винт; 4 – инварный стержень

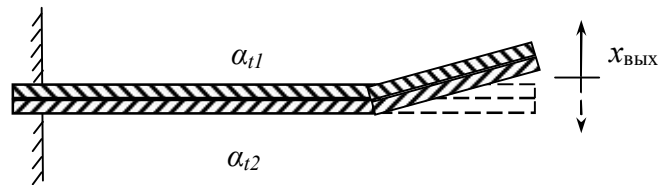


Рис. 3.3. Конструктивная схема биметаллического преобразователя температуры:

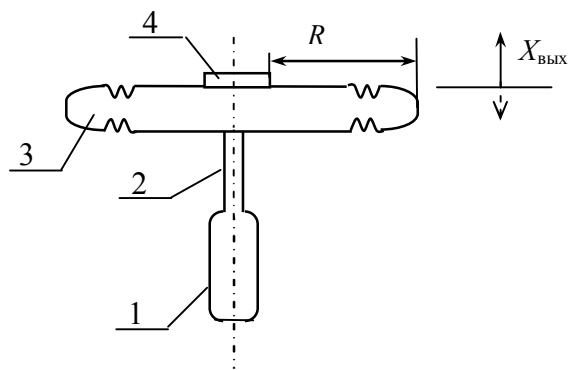


Рис. 3.4. Конструктивная схема манометрического преобразователя температуры:

1 – металлический термобаллон; 2 – металлический капилляр; 3 – мембранная коробка; 4 – жесткий центр мембраны; R – радиус мембраны в свету

Деформационные термомеханические преобразователи основаны на расширении (изменении линейных размеров) твёрдых тел. Различают дилатометрические и биметаллические преобразователи температуры.

Дилатометрический преобразователь температуры

Конструктивная схема дилатометрического преобразователя температуры представлена на рис. 3.2.

Коэффициент линейного расширения материала трубки α_{t1} больше коэффициента линейного расширения материала стержня α_{t4} , поэтому при нагревании трубка расширяется (удлинняется) больше, чем стержень. Так как стержень жестко соединен с трубкой, при удлинении трубки стержень растягивается, и при этом наблюдается дополнительное натяжение струны 2 и увеличении частоты ее колебаний.

Удлинение струны Δl_2 зависит от изменения температуры:

$$\Delta l_2 = (\alpha_{t1} \times l_1 - \alpha_{t4} \times l_4 - \alpha_{t2} \times l_2) \times \Delta t,$$

где α_{t1} – коэффициент линейного расширения материала трубки;

l_1 – первоначальная длина трубки;

α_{t4} – коэффициент линейного расширения материала стержня (инвар);

l_4 – первоначальная длина стержня;

α_{t2} – коэффициент линейного расширения материала струны.

Натяжение струны

$$F = \frac{\Delta l_2}{l_2} = \frac{\Delta l_0 + \Delta l(t)}{l_2} \cdot E \cdot S_2,$$

где Δl_0 – первоначальное удлинение струны при изготовлении датчика;

$\Delta l(t)$ – удлинение струны при нагревании;

l_2 – первоначальная длина струны;

E – модуль упругости материала струны при растяжении;

S_2 – площадь поперечного сечения струны. **Биметаллический преобразователь температуры** состоит из двух сваренных или спаянных по всей поверхности соприкосновения металлических полос с разными коэффициентами линейного расширения ($\alpha_{t2} > \alpha_{t1}$).

Конструктивная схема биметаллического преобразователя температуры представлена на рис. 3.3.

При нагревании пластина из двух металлов изгибается в сторону металла с меньшим коэффициентом линейного расширения α_t .

Чувствительность преобразователя – прогиб конца биметаллической пластины при нагревании на 1°C – определяется размерами пластины и физическими свойствами материалов.

При расчете определяют коэффициент чувствительности преобразователя

$$M = (\alpha_{t2} - \alpha_{t1}) \cdot F_1,$$

где F_l – коэффициент, величина которого зависит от соотношений толщин каждой из металлических полос и модулей упругости их материалов.

Для нормальных биметаллов верны равенства:

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \sqrt{\frac{E_2}{E_1}}, \quad M=1,$$

где δ_1, δ_2 – толщины металлических полос, м;

E_1, E_2 – модули упругости материалов полос.

Сила F , развиваемая свободным концом биметаллической пластины при нагревании до определенной температуры t при нулевом перемещении конца пластины:

$$F = \frac{4}{9} (\alpha_{t1} - \alpha_{t2}) \frac{EJ}{l} t,$$

где J – момент инерции сечения пластины:

$$J = \frac{b\delta^3}{12},$$

где b – ширина биметаллической пластины, м;

δ – толщина биметаллической пластины:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2.$$

Манометрические термометры расширения

Принцип действия манометрических преобразователей температуры основан на расширении (изменении объема) жидкости или газа, заключенных в емкость постоянного объема, при изменении температуры среды.

Конструктивная схема манометрического преобразователя температуры представлена на рис. 3.4.

В качестве термометрического вещества используются жидкости (ртуть, спирты, этанол, метанол в диапазоне температур $-60 \div 300$ °С), инертные газы, азот (в диапазоне температур $-200 \div +600$ °С), парожидкостные смеси таких веществ как, диэтиловый эфир, ацетон, бензол, хлористый этил (на 2/3 баллон заполняется жидкостью, на 1/3 – парами этой жидкости).

Изменение температуры среды, следовательно, и термобаллона вызывает расширение термометрического вещества, вследствие чего изменяются его объем и давление в полости мембранной коробки, что вызывает перемещение ее жесткого центра.

В качестве выходного преобразователя помимо мембранной коробки могут использоваться сильфон и трубчатые пружины.

Статические характеристики жидкостных манометрических преобразователей и газовых в равновесном состоянии линейны. Статические характеристики конденсационных манометрических преобразователей температуры – нелинейны.

Погрешности манометрических термометров:

- капиллярная погрешность (определяется соотношением длин термобаллона и капилляра);
- манометрическая (соотношением коэффициентов объемного расширения жидкости и металла);
- параметрическая, (соотношением коэффициентов линейного расширения материалов термобаллона и капилляра);
- погрешность, обусловленная температурной зависимостью упругих свойств материала манометрической пружины.

Достоинствами манометрических преобразователей температуры являются прочность, взрывобезопасность, возможность дистанционной передачи показаний. К недостаткам – значительная инерционность, невысокая точность измерений, сложность ремонта.

3.2 Расчет манометрических преобразователей температуры

При расчете *жидкостных* манометрических преобразователей температуры определяют:

- 1) перемещение свободного конца мембраны:

$$X_{\text{вых}} = \frac{\Delta V}{S_{\text{эф}}},$$

где ΔV – изменение объема термометрической жидкости:

$$\Delta V = V(\beta_1 - 3\beta_2)\Delta t,$$

β_1 – коэффициент объемного расширения жидкости;

β_2 – коэффициент объемного расширения материала термобаллона;

$S_{\text{эф}}$ – эффективная площадь поверхности мембраны:

$$S_{\text{эф}} = \frac{\pi(R - r)^2}{4},$$

R – радиус мембраны в свету;

r – радиус жесткого центра мембраны.

- 2) изменение давления жидкости

$$\Delta p = \frac{\beta_1}{c} \Delta t,$$

где c – коэффициент сжимаемости жидкости.

При расчете *газовых* манометрических преобразователей температуры определяют:

1) давление газа в системе

$$P_t = P_n [1 + \beta(t_k - t_n)] ,$$

где P_n – начальное давление в системе:

$$P_n = \frac{\Delta p}{\beta(t_k - t_n)} ,$$

Δp – предел измерения манометра;

β – термический коэффициент расширения газа;

$(t_k - t_n)$ – предел измеряемой температуры.

2) необходимая длина капиллярной трубки:

$$l = \frac{4\Delta a V_{бал}}{\pi d^2 (t_{ок} - t_0)} ,$$

где Δa – погрешность прибора от нагрева капиллярной трубки;

$V_{бал}$ – объем термобаллона;

d – внутренний диаметр капиллярной трубки;

$t_{ок}$ – температура среды, окружающей капилляр;

t_0 – температура градуировки прибора (20 °С).

3.3. Термопары

Действие *термоэлектрических термометров* основано на явлении термоэлектрического эффекта: свойстве металлов и сплавов генерировать термоЭДС, величина которой зависит от разности температур в местах соединения двух разнородных проводников (горячего и холодного спаев), образующих чувствительный элемент термометра – термопару.

Возникновение термоЭДС объясняется перемещением электронов из одного проводника в другой и выравниванием их внутренних потенциалов. Величина термоЭДС $E_{вых}$ зависит от разности температур горячего t_1 и холодного t_0 спаев:

$$E_{вых} = f(t_1 - t_0). \quad (20)$$

Горячий (рабочий) спай контактирует с измеряемой средой, холодный спай называют свободным концом термопары.

Конструктивные схемы термопар представлены на рис. 3.5.

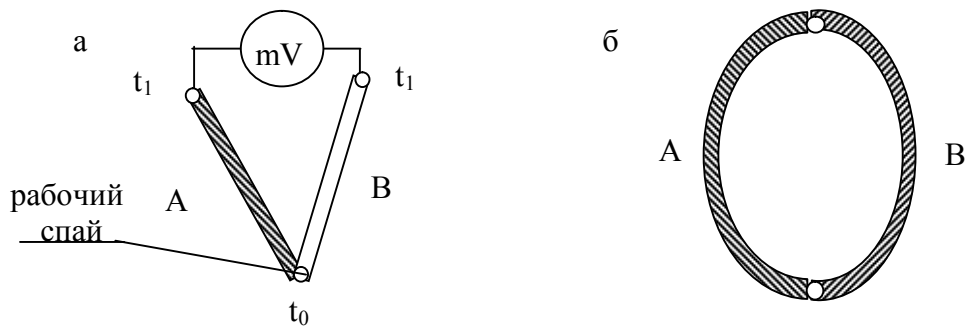


Рис. 3.5. Конструктивные схемы термопар:

а – с V-образной формой электродов; б – с замкнутой системой электродов

В качестве материала термопар используются:

- благородные металлы для диапазона $200 \div 1300$ °С: платина, золото, иридий, родий;
- сплавы теллура, ванадия и иридия ($200 \div 3000$ °С);
- медь, никель (-50 °С \div 1000 °С);
- сталь;
- полупроводники.

Если несколько термопар соединены последовательно, то общая термоЭДС определяется

$$E_{\text{общ}} = E_1 + E_2.$$

Если параллельно:

$$E_{\text{общ}} = \frac{E_1 + E_2}{n},$$

где n – число термопар.

Статические характеристики большинства термопар $E_{AB} = f(t_1, t_0)$ линейны.

На рис. 3.6 представлен вид статических характеристик различных типов термопар, снятых при условии равенства нулю температуры свободных концов ($t_1 = 0$).

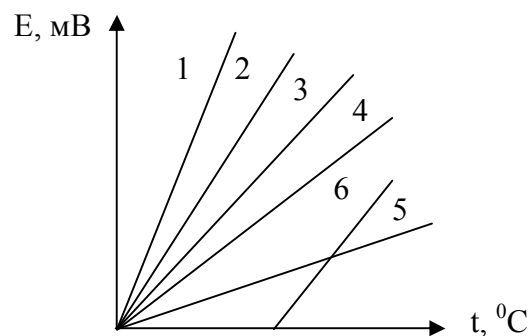


Рис. 3.6. Статические характеристики различных типов термопар:

- 1 – хромель-копель ($-50 \div +600$ °С); 2 – железо-никель ($-500 \div +600$);
- 3 – хромель-алюмель ($-50 \div +1000$ °С); 4 – железоникелевый сплав – копель ($-50 \div +600$ °С); 5 – никелекопелевый сплав – алюмель ($-50 \div +1000$ °С);
- 6 – платина-платина ($-200 \div +1300$ °С)

При $t_1 \neq 0$ находят температурную поправку на показания прибора

$$\Delta = t_1' - k,$$

где t_1' – действительное значение температуры,

k – поправочный коэффициент, зависящий от материала термопары:

– для термопар из благородных металлов $k = 0,5 \div 0,6$;

– для термопар из стали, сплавов меди и никеля $k = 0,8 \div 1,0$.

На рис. 3.7 показано устройство термоэлектрического термометра.

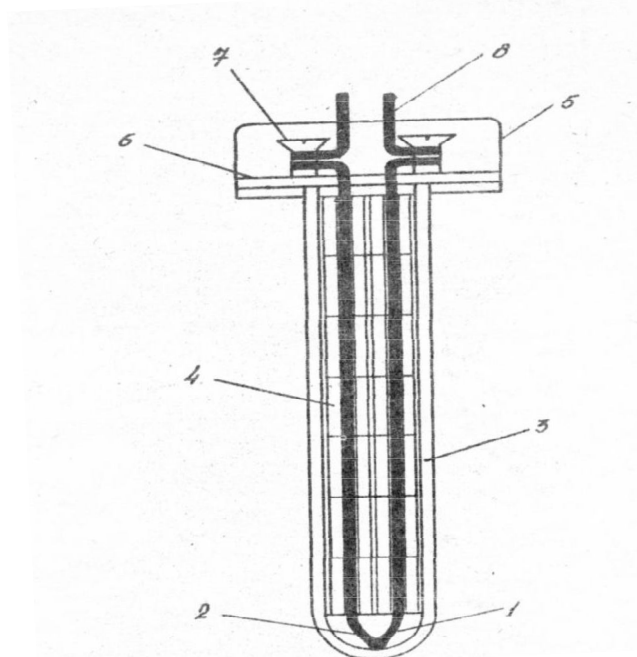


Рис. 3.7. Устройство термоэлектрического термометра

Термоэлектроды 1 расположены так, что их спай 2 касается защитного чехла 3. На термоэлектроды надеты изоляционные бусы 4. На концах защитного чехла крепится головка термометра 5. В головке расположена колодка 6 с зажимами 7 для термоэлектродов и соединительных проводов 8. Рабочий спай чаще всего изготавливается путем сварки или пайки.

Погрешности термоэлектрических преобразователей вызваны:

- погрешностью при градуировке;
- неоднородностью термоэлектрических материалов;
- наличием температуры свободных концов;
- несовершенством изоляции термоэлектродов;
- несовершенством защитной оболочки;
- условиями теплообмена с окружающей средой.

3.4 Термопреобразователи сопротивления (терморезисторы)

Принцип действия термометров сопротивления основан на изменении электрического сопротивления проводников или полупроводников при изменении их температуры.

Требования к материалам чувствительных элементов терморезисторов: материалы должны быть химически инертными; физические и химические свойства материала должны быть устойчивы при повышении температуры; материалы должны иметь большой постоянный температурный коэффициент сопротивления; зависимость изменения электрического сопротивления материала чувствительного элемента от изменения температуры должна быть близка к линейной.

Металлические (проволочные) терморезисторы (ТПС)

Используются чистые металлы – платина, медь, никель.

Диапазон измерения *платиновых* терморезисторов от $-60\text{ }^{\circ}\text{C} \div +1100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Чувствительными элементами платиновых терморезисторов является спираль из проволоки диаметром $0,04 \div 0,07$ мм.

Температурный коэффициент сопротивления платины составляет $0.0039\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Статическая характеристика нелинейна:

$$R_t = R_0 (1 + at + bt^2), \quad (21)$$

где R_0 – сопротивление при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$;

a и b – постоянные коэффициенты.

На рис. 3.8 показано устройство платинового термометра сопротивления. Чувствительный элемент термометра сопротивления выполняется в виде спирали из проволоки 1, помещенной в четырехканальный керамический каркас 2. Для защиты от механических повреждений и вредного воздействия измеряемой или окружающей среды чувствительный элемент помещен в защитную оболочку 2, которая уплотнена керамической втулкой 4. Выводы 5 чувствительного элемента проходят через изоляционную керамическую трубку 6.

Эти элементы находятся в защитном чехле 7, устанавливаемом на объекте измерения с помощью резьбового штуцера 8. На конце защитного чехла располагается соединительная головка 9 термометра. В головке находится изоляционная колодка 10 с винтами 1 для крепления выводов термометра и подключения соединительных проводов, которые выводятся через штуцер. Для уменьшения влияния внешних электрических и магнитных полей чувствительные элементы терморезисторов делаются с безындуктивной намоткой.

В диапазоне изменения температуры от $-200 \div +200\text{ }^{\circ}\text{C}$ длительно используют *медные* терморезисторы.

Чувствительными элементами медных терморезисторов является каркасная или бескаркасная обмотка из провода диаметром $0,06 \div 0,1$ мм в лаковой изоляции; температурный коэффициент сопротивления меди равен $0,00426\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

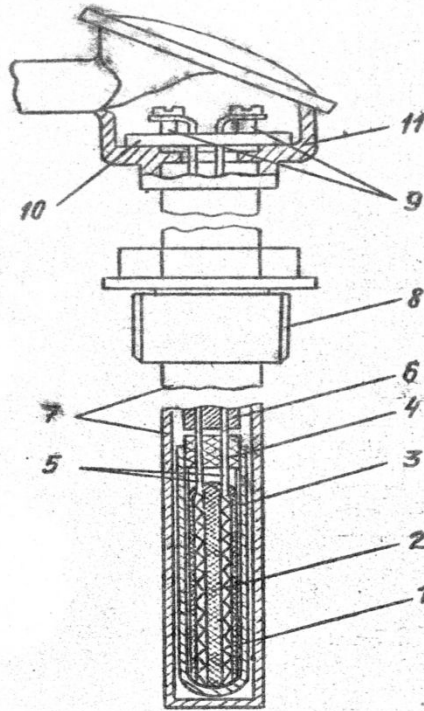


Рис. 3.8. Устройство платинового термометра сопротивления

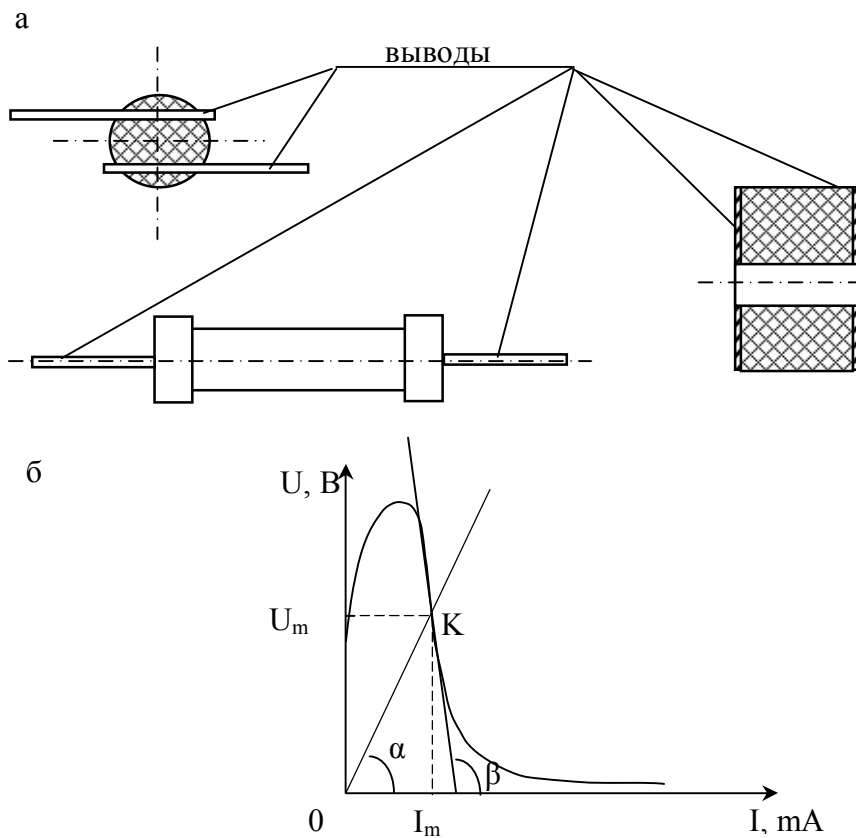


Рис. 3.9. Конструктивные формы (а – шариковая, трубчатая, дисковая) и вольтамперная характеристика (б) полупроводниковых терморезисторов (термисторов)

Статическая характеристика медных терморезисторов линейна:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t) . \quad (22)$$

Достоинствами медных ТПС являются дешевизна, простота получения медной проволоки в различной изоляции. Недостатки – высокая окисляемость при невысоких температурах, малое сопротивление.

В диапазоне температур $-60 \div -300$ °С используются *никелевые* термопреобразователи сопротивления.

Диаметр проволоки никелевых терморезисторов составляет $0,08 \div 0,1$ мм; температурный коэффициент сопротивления никеля – $0,0066$ °С⁻¹

Статическая характеристика нелинейна:

$$R_t = R_0 (1 + at + bt^2) . \quad (23)$$

Достоинствами никелевых ТПС являются высокий температурный коэффициент электрического сопротивления, большое удельное сопротивление. Недостатки – окисляемость при повышенных температурах, нелинейность статической характеристики.

Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления (ПТР)

В качестве материала чувствительного элемента ПТР используют смеси германия, окислов, солей и карбидов металлов (меди, марганца, титана, железа, никеля, ванадия), спрессованные и спеченные при высокой температуре. Чувствительные элементы изготавливают в виде шариков, трубок, дисков с металлизацией торцевых поверхностей. На рис. 3.9 представлены конструктивные формы полупроводниковых терморезисторов.

В диапазоне температур $1,5 \div 30$ К используются терморезисторы из легированного сурьмой германия, при $4,2 \div 13,8$ К – из германия, при температуре до 300 К – пленочные германиевые ПТР.

К достоинствам ПТР относятся: чрезвычайно высокая чувствительность; малая инерционность; небольшие размеры; возможность получения измерительных элементов различной геометрической формы; большой температурный коэффициент сопротивления $(3 \div 4) \cdot 10^{-2}$ °С⁻¹.

Недостатки – отсутствие взаимозаменяемости; необходимость индивидуальной градуировки; нелинейная зависимость электрического сопротивления от температуры; малая допустимая мощность рассеяния при прохождении измерительного тока.

Основные характеристики терморезисторов

Статическая (температурная) характеристика представляет собой зависимость сопротивления материала чувствительного элемента от температуры.

Полупроводниковые терморезисторы имеют статическую характеристику вида

$$R = R_{\infty} e^{\frac{B}{T} - \frac{B}{T_1}}, \quad (24)$$

где R_{∞} , B – постоянные коэффициенты:

$$B = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2}; \quad (25)$$

$$R_{\infty} = R_1 e^{-\frac{B}{T_1}}. \quad (26)$$

T , T_1 , T_2 – температура, K .

Вольтамперная характеристика терморезистора $U=f(I)$ – зависимость падения напряжения на терморезисторе от протекающего через него тока.

Статическая вольтамперная характеристика полупроводниковых терморезисторов – это зависимость между протекающим через них током и падением напряжения при установившемся режиме нагрева.

В связи с тем, что при прохождении через терморезистор тока в нем выделяется тепло, температура рабочего тела оказывается выше температуры окружающей среды. Сопротивление терморезистора принимает значение, соответствующее этой суммарной температуре.

Если сопротивление терморезистора связано с температурой нелинейной зависимостью, вольтамперная характеристика также нелинейна.

На рис. 3.9 представлен вид вольтамперной характеристики полупроводникового терморезистора.

Статическое сопротивление терморезистора зависит от величины установившегося через него тока и определяется как отношение падения напряжения на терморезисторе к протекающему через него току в установившемся режиме:

$$R = \frac{U}{I}, \quad (27)$$

где U – падение напряжения на терморезисторе, В;

I – установившийся ток через терморезистор, мА.

По величине статического сопротивления R можно найти температуру рабочего тела терморезистора, соответствующую данной точке вольтамперной характеристики. Для этого надо располагать температурной характеристикой данного терморезистора.

Дифференциальное сопротивление равно пределу отношения приращения напряжения на терморезисторе к приращению тока в нем, когда последнее приращение стремится к нулю $r_d = \frac{dU}{dI}$. Если вольтамперная характеристика имеет точку максимума, то в этой точке дифференциальное сопротивление равно нулю. Правее точки максимума $r_d < 0$.

Статическое сопротивление пропорционально тангенсу угла α , образованного секущей, проведенной из начала координат в рассматриваемую точку вольтамперной характеристики (точка K на рис. 3.9), и осью токов $R = tg\alpha$. Дифференциальное сопротивление пропорционально тангенсу угла β , образованного касательной в рассматриваемой точке характеристики с осью токов $r_d = tg\beta$.

Вольтамперная характеристика ПТР может иметь точку максимума только при условии $1 - \frac{4T}{B} > 0$ или $B > 4T_0$.

Способы расчета вольтамперных характеристик

Метод пересчета координат точек вольтамперной характеристики, снятой при температуре среды T_0 , на новую температуру $(T_0 + \Delta T_0)$.

Метод сводится к вычислению координат точки искомой вольтамперной характеристики по формулам, устанавливающим связь этих координат с координатами точки K исходной вольтамперной характеристики, при некотором ограничении положения искомой точки.

Этот метод расчета вольтамперных характеристик предусматривает наличие исходной вольтамперной характеристики и температурной характеристики данного экземпляра терморезистора.

Метод расчета вольтамперных характеристик по температурной характеристике и характеристике рассеяния.

Чтобы построить вольтамперную характеристику при заданной температуре среды T_0 , достаточно задать ряд значений температуры рабочего тела терморезистора T и определить по температурной характеристике соответствующее каждому значению температуры сопротивление R .

По типовой характеристике рассеяния находят величину коэффициента рассеяния для каждого значения перегрева Θ . Подставляя найденные значения R , Θ и η в уравнение теплового баланса, подсчитывают величину тока.

Характеристика рассеяния представляет собой зависимость количества мощности, отдаваемой с поверхности терморезистора, от перегрева:

$$\eta = f(\theta),$$

где η – коэффициент теплоотдачи; θ – температура перегрева.

Коэффициент теплоотдачи учитывает все виды теплоотдачи с поверхности терморезистора: теплопроводность, конвекцию, тепловое излучение. Его величина зависит от вида материала, размеров, состояния поверхности рабочего тела.

Чтобы построить характеристику рассеяния, надо располагать вольт-амперной $U=f(I)$ и температурной $R(t)$ характеристиками терморезистора. На вольтамперной характеристике выбирают ряд точек, в каждой из которых подсчитывают статическое сопротивление. Затем по температурной характеристике находят температуру терморезистора, соответствующую каждой из выбранных точек вольтамперной характеристики, и, вычитая из нее температуру среды T_0 , определяют значения температуры перегрева θ . Величину η подсчитывают по уравнению теплового баланса.

Основные параметры терморезисторов

Допустимая температура $T_{дон}$ определяется свойствами рабочего материала и конструктивными особенностями терморезистора.

Часто величина допустимой температуры устанавливается в зависимости от температуры плавления припоя, которым рабочее тело соединено с токоподводящими деталями.

Температурный коэффициент сопротивления α_t выражает в процентах изменение абсолютной величины сопротивления при изменении температуры терморезистора на 1К:

$$\alpha_t = \frac{B}{T^2} 100\% (\% / K).$$

Вследствие нелинейности температурной характеристики значение температурного коэффициента зависит от величины температуры, поэтому его записывают с индексом, указывающим температуру, при которой имеет место данное значение.

Постоянная времени τ – время, в течение которого температура рабочего тела терморезистора при его свободном охлаждении понижается на 63% от первоначальной разницы температур рабочего тела и окружающей среды.

Теплоемкость H – количество теплоты, которое необходимо сообщить рабочему телу терморезистора, чтобы повысить его температуру на 1К:

$$H = \tau \cdot \eta \text{ (Дж / K)}.$$

Из трех параметров τ , H и η теплоемкость менее других зависит от температуры.

Коэффициент энергетической чувствительности G – мощность, которую нужно выделить в терморезисторе для уменьшения его сопротивления на 1%.

Величина коэффициента энергетической чувствительности зависит от режима работы ПТР, т. е. будет различной в каждой точке вольтамперной характеристики.

$$G = \frac{\eta \text{ Вт}}{\alpha \text{ \%}}.$$

Максимально допустимый ток $I_{\text{доп max}}$ – ток, при протекании которого через рабочее тело терморезистора его температура будет равна допустимому значению $I_{\text{доп max}} = f(T_{\text{доп}})$.

Величина допустимого тока зависит от температуры среды и ее характера. При одинаковой температуре двух сред допустимый ток будет больше в той среде, которая обладает большей теплопроводностью.

Для определения допустимого тока на вольтамперной характеристике следует нанести прямую линию, соответствующую сопротивлению рабочего тела терморезистора при $T_{\text{доп}}$. Точка пересечения этой прямой с вольтамперной характеристикой соответствует допустимому току.

Перечисленные параметры можно назвать паспортными данными терморезистора, так как они полностью отражают свойства и достаточны для проведения расчетов статических и динамических режимов электрических цепей с терморезисторами.

Погрешности термометров сопротивления обусловлены:

- погрешностью градуировки;
- нестабильностью характеристик термометра;
- условиями теплообмена с окружающей средой;
- нагревом чувствительного элемента при прохождении по нему тока;
- изменением сопротивления цепи;
- термической инерцией термометра и вторичного прибора;
- условиями эксплуатации измерительного комплекса.

3.5 Схемы включения термопар и терморезисторов

На рис. 3.10 приведены простейшая схема включения термопары и схема включения блока из нескольких последовательно соединенных термопар, используемая в системах автоматического регулирования для осреднения температуры в каких-либо замкнутых объемах.

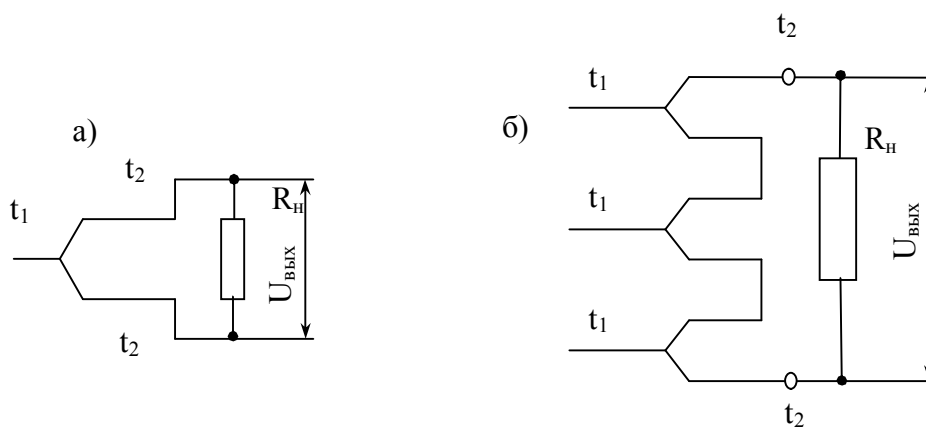


Рис. 3.10. Схемы включения термопар:
а – простейшая схема включения; б - блок последовательно включенных термопар

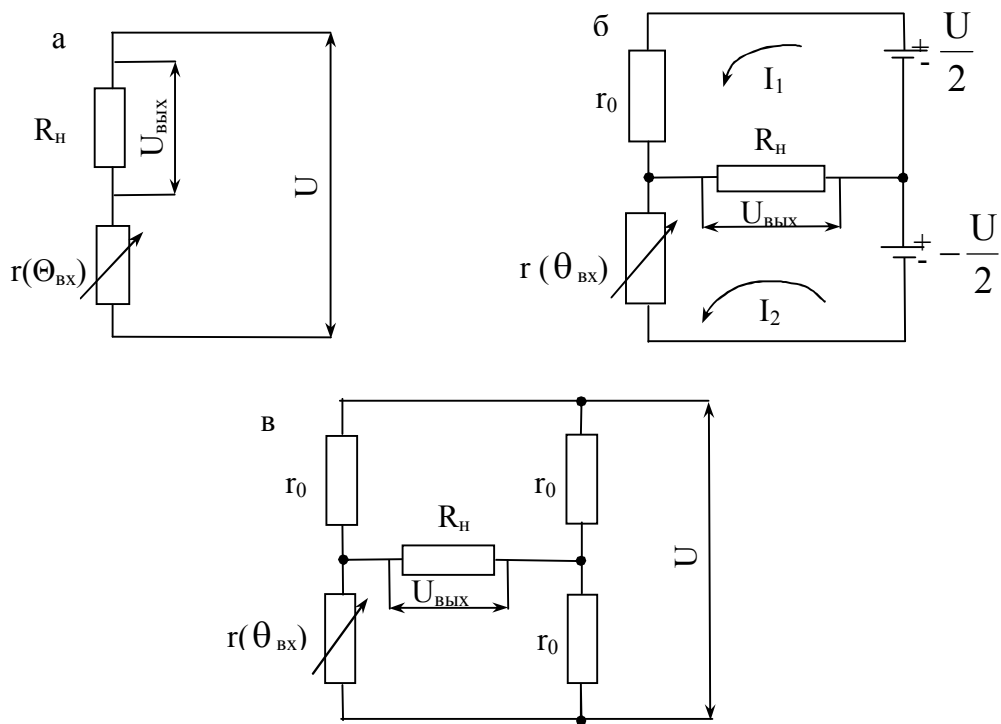


Рис. 3.11. Схемы включения терморезисторов
а – простейшая нереверсивная схема; б – реверсивная дифференциальная на постоянном токе; в – реверсивная мостовая схема

Простейшая схема включения терморезистора приведена на рис. 3.11а. Так как терморезисторы являются датчиками параметрического типа, в схеме используется вспомогательный источник энергии U .

Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ на нагрузке в установившемся режиме зависит от температуры:

$$U_{\text{вых}} = \frac{UR_{\text{н}}}{R_{\text{н}} + r(\theta_{\text{вх}})},$$

где $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки, Ом;
 $r(\theta_{\text{вх}})$ – терморезистор.

На рис. 3.11б представлена реверсивная дифференциальная схема постоянного тока. При равенстве напряжений вспомогательных источников энергии и величин постоянного сопротивления r_0 и термосопротивления $r(\theta_{\text{вх ном}})$, токи I_1 и I_2 в верхнем и нижнем контурах будут одинаковы, и ток через нагрузку $I_{\text{н}}$ будет равен нулю. При нарушении равновесия схемы, т.е. при температуре, отличной от номинальной, появится падение напряжения на нагрузке $U_{\text{вых}}$.

Реверсивная мостовая схема включения терморезистора приведена на рис. 3.11в.

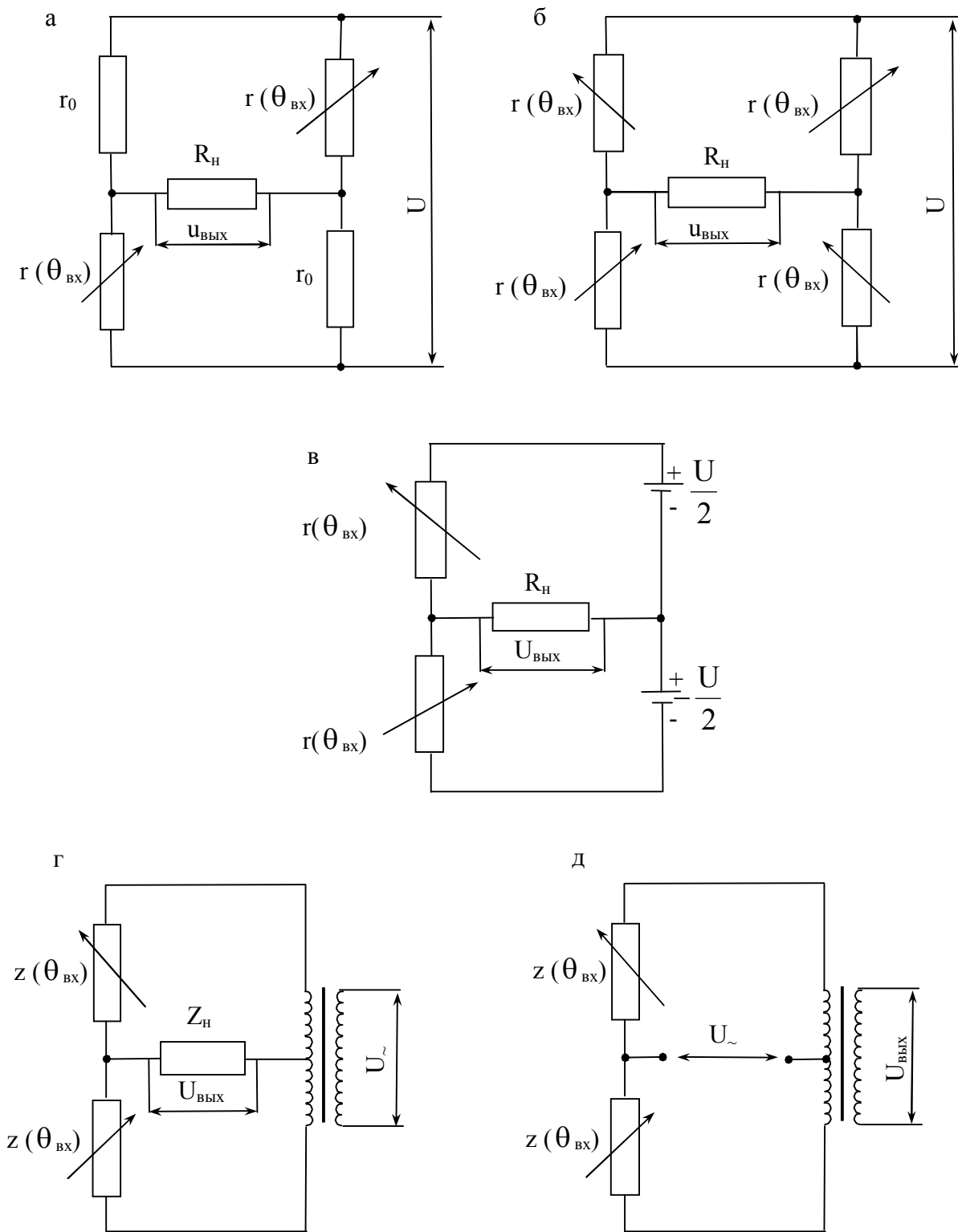


Рис. 3.12. Схемы с двумя терморезисторами:

а – мостовая схема с терморезисторами с ТКС одного знака; б – мостовая схема с двумя парами терморезисторов с ТКС разного знака; в – дифференциальная схема с терморезисторами с ТКС разного знака на постоянном токе; г – дифференциальная с терморезисторами с ТКС разного знака на переменном токе с трансформатором с нулевой точкой; д – дифференциально-мостовая схема с выходным трансформатором

Чувствительность мостовой схемы увеличится в два раза, если использовать два одинаковых терморезистора (рис. 3.12а) или две пары терморезисторов с ТКС разного знака (рис. 3.12б).

Если в противоположные плечи дифференциальной схемы включены два терморезистора с ТКС разного знака (металлические, полупроводниковые), то это значительно увеличивает чувствительность схемы (рис. 3.12в).

При питании от источника переменного тока наиболее используемыми являются дифференциальная схема с двумя терморезисторами с ТКС разного знака и трансформатором с нулевой точкой и дифференциально-мостовая схема с выходным трансформатором (рис. 3.12г, д).

Характеристики некоторых типов термопар приведены в табл. Г1, Г2 приложения. Характеристики некоторых типов металлических терморезисторов приведены в табл. Г3 приложения.

4. ДАТЧИКИ УГЛА ПОВОРОТА

4.1. Сельсинные датчики угла поворота

Сельсином называется индукционная электрическая микромашина, обладающая способностью синхронизации.

Особенность применения в САУ – использование их в паре: сельсин-датчик (СД) и сельсин-приемник (СП).

Сельсинная пара может работать в следующих режимах:

- индикатором – для дистанционной передачи команд или управляющих сигналов;
- трансформаторном – для измерения разности между угловыми положениями механически не связанных валов;
- режиме алгебраического суммирования угловых перемещений двух механически не связанных между собой валов.

Классификация сельсинов

- 1) по выполненным функциям в паре: сельсин – датчик; сельсин – приемник;
- 2) по числу фаз питающего напряжения: однофазные, трёхфазные;
- 3) по конструктивному исполнению однофазные сельсины: машины с явно выраженными полюсами статора, с явно выраженными полюсами ротора;
- 4) по точности: сельсины первого, второго и третьего классов точности;
- 5) по характеру токоподвода: контактные, бесконтактные.

Магнитная система неявнополюсного бесконтактного сельсина состоит из статора и ротора, а также кольцевого трансформатора. Бесконтактный сельсин имеет две обмотки. Обмотку возбуждения располагают между статором и торцевыми магнитопроводами, обмотка синхронизации укладывается в пазах статора. Ротор набирается из листов электротехнической стали.

На рис. 4.1 представлена конструкция неявнополюсного бесконтактного сельсина.

У контактных сельсинов на полюсах (статора или ротора) располагается однофазная обмотка возбуждения. Трехфазная обмотка синхронизации укладывается в пазах (ротора или статора). Преимуществом этой конструкции является удобство балансировки ротора. Если на полюсах ротора размещают обмотку возбуждения, это уменьшает трение, и позволяет использовать сельсины в маломощных дистанционных передачах. Напряжение питания подводится к однофазной обмотке возбуждения.

Принцип действия однофазного контактного сельсина состоит в изменении взаимной индукции между обмотками ротора и статора, при повороте вала ротора относительно исходного положения. В исходном положении магнитная связь между обмоткой возбуждения и первой катушкой обмотки синхронизации будет максимальна.

При повороте ротора на угол α магнитный поток возбуждения будет пронизывать проводники обмотки первой катушки под углом α , проводники обмотки второй катушки соответственно под углом $\alpha + 120^\circ$, третьей - $240^\circ + \alpha$.

ЭДС, индуцируемые в этих катушках:

$$E_1 = E_{\max} \cos \alpha = 4,44 f_1 W \Phi_m \cos \alpha;$$

$$E_2 = E_{\max} \cos (\alpha + 120);$$

$$E_3 = E_{\max} \cos (\alpha + 240),$$

где f_1 – частота питающего напряжения, с^{-1} ;

W – число витков обмотки возбуждения;

Φ_m – амплитуда магнитного потока возбуждения,

α – угол поворота вала ротора сельсина.

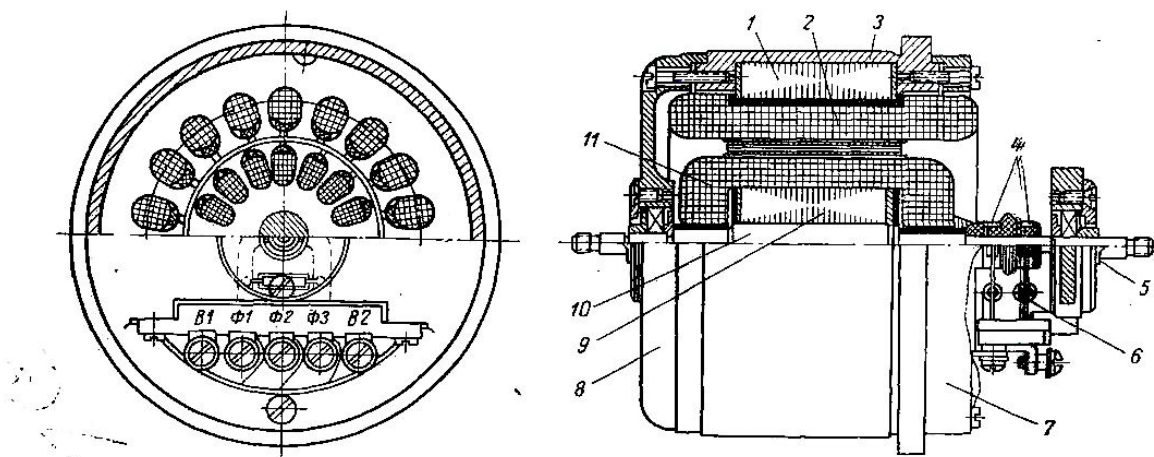


Рис. 4.1. Конструкция неявнополюсного бесконтактного сельсина:

- 1 – пакет статора, 2 – обмотка синхронизации; 3 – корпус;
- 4 – контактные кольца; 5 – установочное кольцо; 6 – щеточное устройство;
- 7 – передняя крышка; 8 – задняя крышка; 9 – пакет ротора; 10 – ось ротора;
- 11 – обмотки возбуждения и демпферная

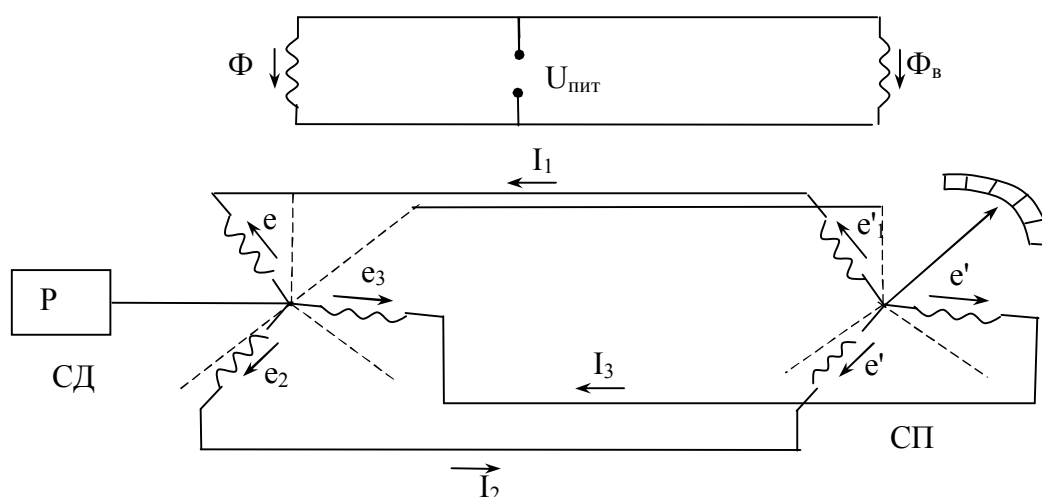


Рис. 4.2. Индикаторный режим работы сельсинов

Индикаторный режим работы сельсинов

Вал ротора сельсин-датчика жестко соединен с валом рабочего механизма РМ. На вал ротора сельсин-приемника установлена индикаторная стрелка, регистрирующая положение вала рабочего механизма (рис. 4.2). Сельсин-датчик преобразует угловое положение оси рабочего механизма в группу напряжений, которые преобразуются сельсин-приемником в угловое положение своего ротора. Если углы α и β поворота осей сельсин-датчика и сельсин-приемника равны, то ЭДС, возникающие в обмотках равны и направлены встречно, следовательно, токи в соединительных проводах отсутствуют.

При наличии рассогласования между валами сельсинов ($\alpha \neq \beta$) в соединительных проводах и обмотках потекут токи, создающие магнитные потоки, взаимодействующие с магнитным потоком возбуждения. В результате этого взаимодействия на валах сельсинов появляются синхронизированные моменты, равные по величине и противоположны по направлению. Равенство этих моментов объясняется идентичностью конструкций сельсин-датчика и сельсин-приемника и тем, что токи в обмотках одинаковы по величине, но противоположны по направлению. Вал ротора сельсин-приемника под действием синхронизирующего момента будет поворачиваться до полной компенсации угла рассогласования.

Статической характеристикой сельсинов режима является зависимость синхронизирующего момента от угла рассогласования.

Трансформаторный режим работы сельсинов

Вал ротора сельсин-датчика связан с валом рабочего механизма РМ₁.

Вал ротора сельсин-приемника связан с валом рабочего механизма РМ₂. Трехфазные обмотки соединены трехпроводной линией связи. Обмотка возбуждения сельсин-датчика питается переменным током постоянной амплитуды и частоты (рис. 4.3).

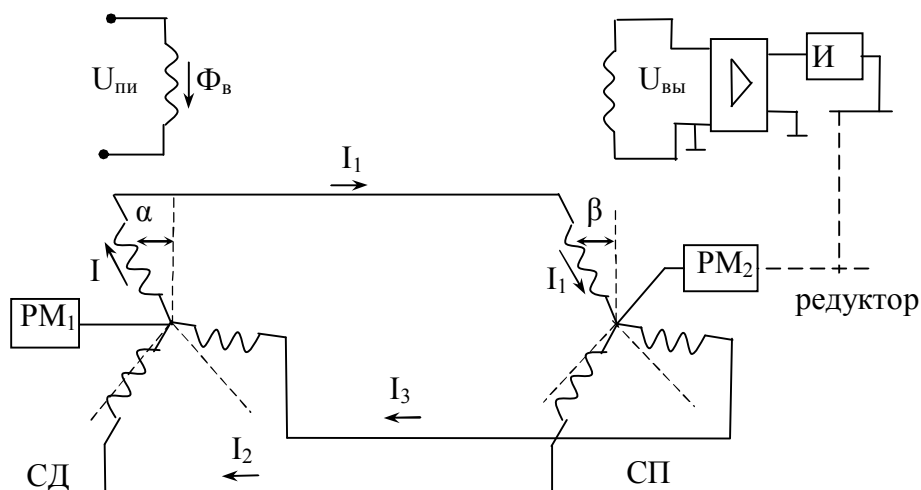


Рис. 4.3. Трансформаторный режим работы сельсинов

Магнитный поток возбуждения $\Phi_{\text{в}}$ индуцирует в катушках трехфазной обмотки ротора сельсин-датчика ЭДС, под действием которой по соединительным проводам и обмоткам потекут токи, создающие магнитодвижущие силы.

В обмотках ротора сельсин-приемника потекут токи, равные по величине токам в обмотке ротора сельсин-датчика, но противоположные по направлению. МДС, созданные этими токами, будут иметь линию действия, направленную под углом α к оси первой катушки. Направление вектора МДС ротора сельсин-приемника будет противоположным по отношению к вектору МДС ротора сельсин-датчика.

МДС в расточке статора сельсин-приемника создает переменный магнитный поток, который индуцирует ЭДС в однофазной обмотке, которая и является выходным сигналом.

При равенстве углов α и β линии действия МДС сельсин-датчика и МДС сельсин-приемника будут совпадать с осями однофазных обмоток, следовательно, переменный магнитный поток будет иметь максимальное значение.

Рассогласование валов PM_1 и PM_2 приведет к тому, что линия действия МДС сельсин-приемника будет направлена под углом $\Theta = \alpha - \beta$ к продольной оси выходной обмотки, следовательно, его значения будут определяться: $\Phi_d = \Phi_{d \max} \cos \Theta$.

Статическая характеристика трансформаторного режима – зависимость выходного напряжения от $\cos \Theta$: $U_{\text{вых}} = 4,44 W f_1 \Phi_{d \max} \cos \Theta$.

Режим алгебраического суммирования угловых перемещений двух механических не связанных между собой валов

Между двумя сельсин-датчиками, валы роторов которых механически соединены с рабочими механизмами PM_1 и PM_2 , включен дифференциальный сельсин B , конструктивно выполненный как сельсин-датчик (рис. 4.4).

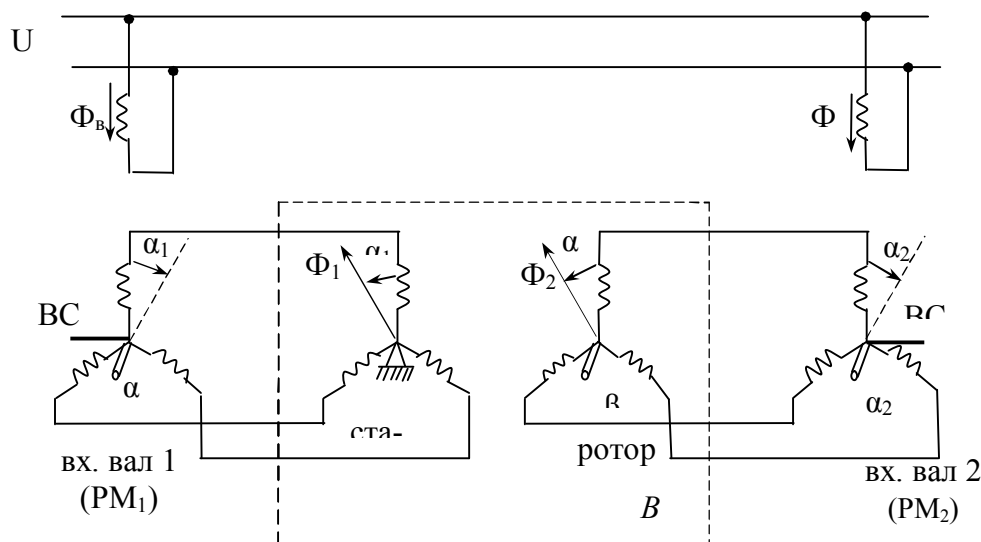


Рис. 4.4. Режим алгебраического суммирования угловых перемещений двух механических не связанных между собой валов

Выходным (исполнительным) является вал ротора дифференциального сельсина.

Погрешности сельсинов

Погрешности сельсинов возникают как в процессе их производства (несбалансированность ротора, не идентичность исполнения сельсинной пары, неравномерностью магнитной проводимости ротора и статора из-за наличия пазов, наличие момента трения в подшипниках и токосъемных устройствах), так и в процессе эксплуатации (изменение момента трения, влияние колебаний частоты напряжения источника питания, влияние длины токопроводящих линий связи).

4.2 Расчет сельсинов

Расчет сельсинов включает следующие этапы:

Расчет магнитной цепи и обмотки возбуждения

Для контактных сельсинов расчет магнитной цепи и параметров намагничивающего контура сводится к определению коэффициента k_{μ} , характеризующего эффективное увеличение воздушного зазора за счет магнитного сопротивления магнитопровода. По заданной геометрии магнитопровода рассчитывают табличные зависимости вещественной и мнимой составляющих коэффициента k_{μ} от максимальной индукции магнитного поля в воздушном зазоре. Для режима холостого хода, задавшись допустимыми потерями в машине или плотностью тока в обмотке возбуждения, определяют эффективные витки обмотки возбуждения и соответствующие значения индукции и магнитного потока сельсина. Плотность тока при расчете не должна превосходить допустимой по условиям нагрева величи-

ны ($5 \div 8 \text{ А/мм}^2$). При больших плотностях тока необходимо снизить максимальное значение магнитной индукции и, соответственно, увеличить число витков первичной обмотки.

Расчет обмотки синхронизации

Эффективные витки фазы обмотки синхронизации $W_{\phi-\varepsilon}$ находятся по величинам первой гармоники индукции магнитного поля в воздушном зазоре и ЭДС фазы синхронизирующей обмотки E_{ϕ} , исходя из формулы

$$E_{\phi} = \pi \sqrt{2} B_{\delta} D l W_{\phi} k_{об} f .$$

После выбора схемы обмотки и определения ее обмоточного коэффициента $k_{об}$ вычисляют числа проводников в пазах и сечение провода:

$$W_n = \frac{6W_{\phi}}{z_c}; \quad q_0 = \frac{S_{nc1k_{з.н.}}}{W_n} .$$

Расчет параметров сельсинов по продольной и поперечной осям

Значения параметров фазы синхронизирующей обмотки по продольной и поперечной осям Z_d, Z_q зависят от типа сельсина, геометрии магнитопровода, наличия короткозамкнутых демпферных контуров.

В табл. Д приложения приведены сводные формулы, необходимые для расчета указанных параметров сельсинов.

Расчет рабочих характеристик системы синхронной передачи на сельсинах

Рабочими характеристиками системы синхронной передачи на сельсинах являются: удельный момент m ; синхронизирующий момент M , определяемый параметрами фазы синхронизирующей обмотки по продольной и поперечной осям r_d, r_q ; фазный ток в цепи синхронизации I_a ; ЭДС управляющей обмотки, выходное сопротивление и удельная мощность.

Динамические характеристики сельсинов

При линейной аппроксимации статической характеристики сельсинный датчик угла рассогласования можно считать безынерционным звеном.

В табл. Д приложения приведены формулы для расчета параметров сельсинов.

5. ДАТЧИКИ СКОРОСТИ

5. 1. Датчики угловой скорости (тахогенераторы)

Тахогенератор представляет собой электромеханический элемент, преобразующий частоту вращения какого-либо вала в электрический сигнал.

Применяются *тахогенераторы* в САУ в качестве элементов первичной информации (для измерения угловой скорости вращения валов рабочих механизмов) и в качестве корректирующих элементов, выполняющих стабилизацию частоты вращения.

Классификация тахогенераторов:

- 1) по роду тока: тахогенераторы переменного и постоянного токов;
- 2) по способу возбуждения: тахогенераторы постоянного тока: магнитно-электрические (с возбуждением постоянными магнитами); электрические, имеющие обмотку возбуждения с независимым источником питания;
- 3) тахогенераторы переменного тока: синхронные, асинхронные.

Тахогенераторы постоянного тока

Различают тахогенераторы с магнитоэлектрическим и электрическим возбуждением. На рис. 5.1 представлены конструктивные схемы тахогенераторов постоянного тока.

Стабилизация тока в обмотке возбуждения достигается питанием обмотки от источника стабилизированного напряжения, применением температурной компенсации изменения сопротивления.

Статическая характеристика тахогенератора $U_{\text{ВЫХ}} = k\omega$, k – коэффициент преобразования, составляет от 3 до 100 мВ·мин⁻¹. Статическая характеристика линейна при постоянном магнитном потоке возбуждения (рис. 5.2).

Синхронные тахогенераторы применяются для контроля частоты вращения каких-либо валов. В САУ практически не применяются, так как изменяется не только амплитуда выходного сигнала $U_{\text{ВЫХ}}$, но и его частота, то есть статические характеристики не линейны.

В САУ в качестве датчика угловой скорости применяют *асинхронные* тахогенераторы. На статоре расположены две обмотки, сдвинутые в пространстве на 90° относительно друг друга: обмотка возбуждения, питаемая переменным напряжением постоянной амплитуды и частоты, и генераторная обмотка – квадратурная, в которой создается выходное напряжение. Ротор выполняется полым или короткозамкнутым.

При неподвижном роторе работа тахогенератора подобна работе трансформатора с замкнутой вторичной обмоткой.

Рис. 5.3 поясняет принцип действия асинхронного тахогенератора при неподвижном и подвижном роторе.

При включении обмотки возбуждения ОВ в цепь переменного тока с напряжением U_1 и частотой f_1 возникает МДС возбуждения и в магнитопроводе наводится пульсирующий магнитный поток Φ_B , который пронизывая полый ротор, наводит в нем трансформаторную ЭДС. В генераторной обмотке поток возбуждения Φ_B не наводит ЭДС, так как ось обмотки генераторной обмотки перпендикулярна оси обмотки возбуждения.

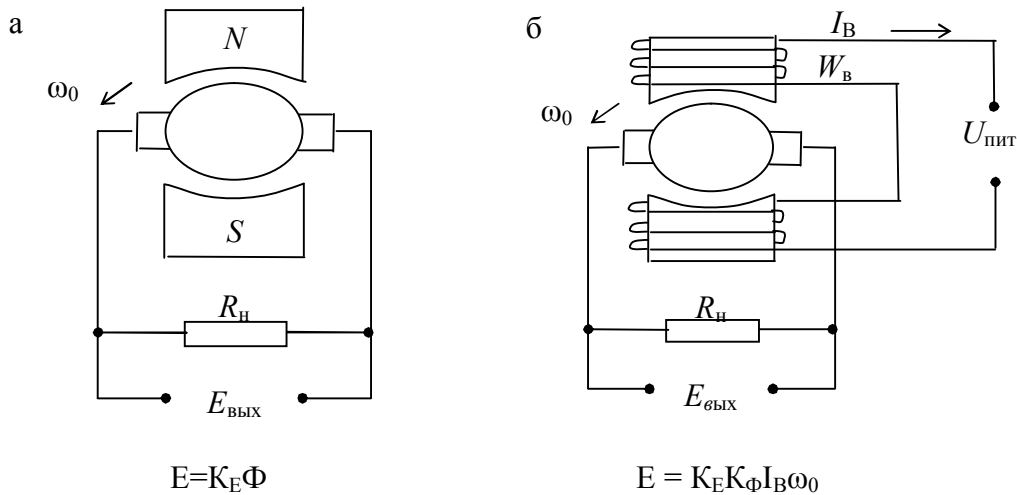


Рис. 5.1. Конструктивные схемы тахогенераторов постоянного тока:
 а) с магнитоэлектрическим возбуждением;
 б) с электрическим возбуждением

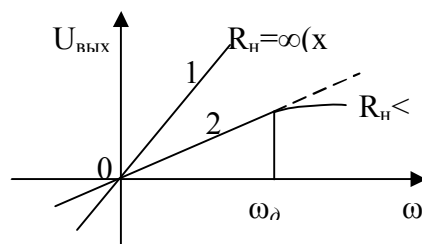


Рис. 5.2. Статическая характеристика тахогенератора:
 1 – идеальная характеристика; 2 – реальная характеристика

Под действием трансформаторной ЭДС в стенках полого ротора возникают токи $I_{2тр}$, практически совпадающие с ней по фазе, так как ротор имеет большое активное сопротивление. Токи $I_{2тр}$ создают МДС $F_{2д}$ ротора, направленную встречно МДС $F_в$. В результате взаимодействия $F_{2д}$ и $F_в$, создается результирующий магнитный поток Φ_d , пульсирующий с частотой f_l .

При вращении ротора тахогенератора с частотой $n \neq 0$, при пересечении стенками стакана ротора силовых линий магнитного потока Φ_d в роторе наводится ЭДС вращения, значение которой пропорционально индукции магнитного поля B_d . Частота изменения ЭДС вращения зависит от частоты пульсации магнитного потока Φ_d , то есть от f_l . Максимальное значение ЭДС вращения наблюдается в точках стенок ротора, которые расположены по продольной оси $d-d$, так как в этих точках значение B_d максимально.

Под действием ЭДС вращения в роторе возникают токи $I_{2вр}$, совпадающие с ней по фазе. Токи $I_{2вр}$ создают в роторе МДС F_{2q} , направленные

по поперечной оси. МДС F_{2q} создают магнитный поток Φ_{2q} , который наводит в генераторной обмотке переменную ЭДС E_{Γ} .

Так как $e_2 \sim n$, $I_{2вр} \sim n$; $F_{2q} \sim n$, магнитное сопротивление R_{mq} постоянно, следовательно, $\Phi_{2q} \approx F_{2q} / R_{mq}$ и $\Phi_{2q} \sim n$, следовательно, значение ЭДС в генераторной обмотке $E_{\Gamma} = 4,44 \cdot f_1 \cdot C_q \cdot W_{\Gamma} \cdot k_{об\Gamma} \cdot n$.

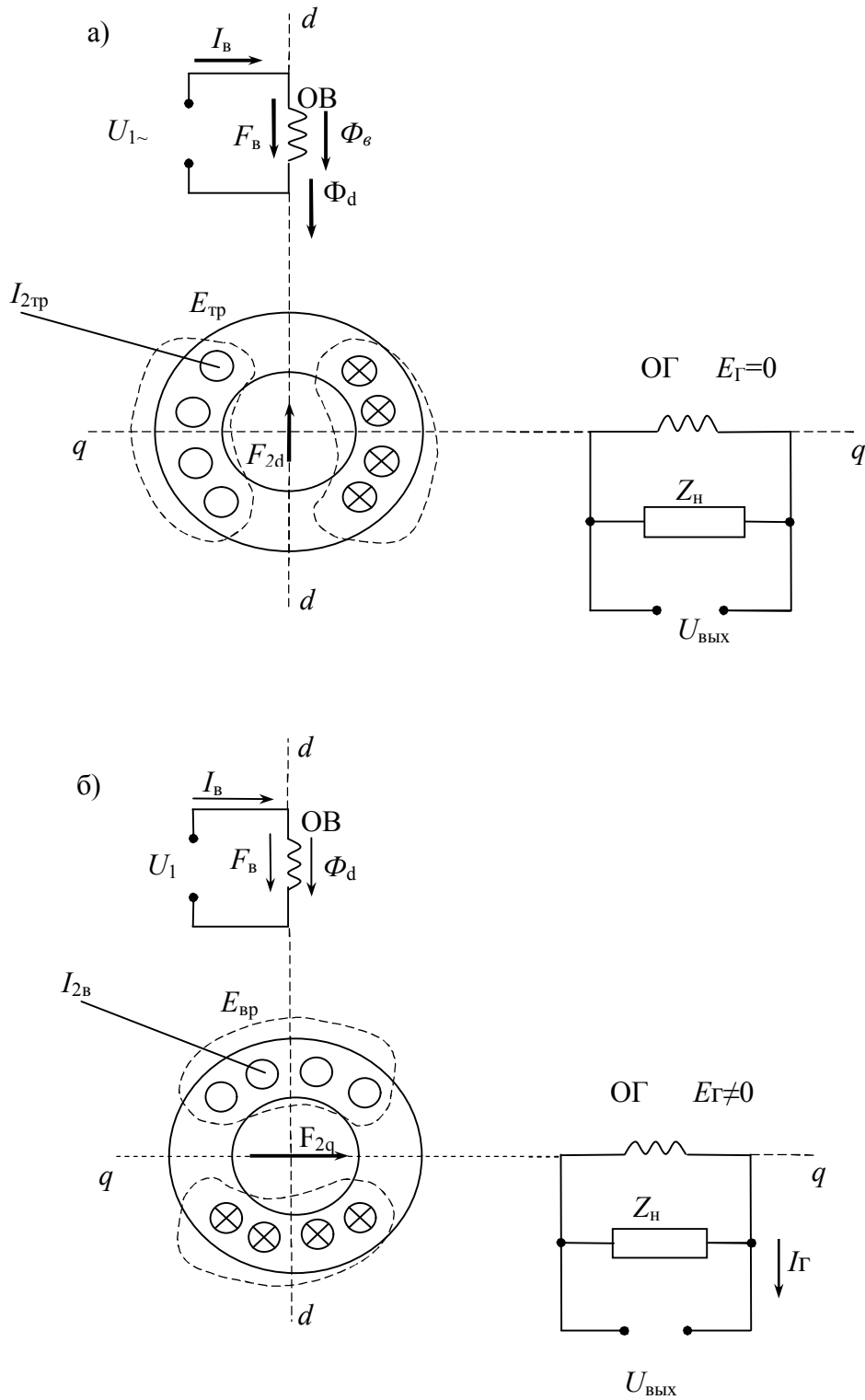


Рис. 5.3. Принцип действия асинхронного тахогенератора при неподвижном (а) и подвижном (б) роторе

При подключении к генераторной обмотке сопротивления Z_n в её цепи появится ток I_r . Так как Z_n достаточно большое, то ток I_r невелик и не вызывает значительного падения напряжения на нагрузке. Поэтому $U_{\text{вых}} \approx E_r$. и $U_{\text{вых}} \approx C_e \cdot n$. То есть, амплитуда выходного напряжения пропорциональна частоте вращения ротора n , а частота выходного напряжения равна f_1 .

Погрешности реальных асинхронных тахогенераторов

С ростом тока I_r выходное напряжение всё больше отличается от ЭДС в генераторной обмотке амплитудой и фазой, возникают амплитудная и фазовая погрешности.

Амплитудная и фазовая погрешности зависят от частоты вращения ротора n , температуры и от частоты питающего напряжения f_1 .

Все погрешности можно разделить на скоростные, температурные, частотные и вызванные остаточной ЭДС.

Преимущества и недостатки асинхронных тахогенераторов

Преимущества асинхронных тахогенераторов: отсутствие скользящего контакта; отсутствие зоны нечувствительности на статической характеристике; малая инерционность у тахогенератора с полым ротором.

Недостатки: нелинейность выходной характеристики, несимметричность выходной характеристики, небольшая выходная мощность, повышенные габариты и масса.

Требования к тахогенераторам:

- выходная характеристика должна быть прямолинейной и иметь наибольшую крутизну;
- на её форму не должны влиять внешние факторы: температура и давление; выходное напряжение при $n=0$ должно быть минимальным;
- выходное напряжение должно быть симметричным;
- выходная мощность должна быть достаточной для подключения к нему приборов;
- пульсации выходного напряжения должны быть минимальными.

Динамические характеристики

Тахогенераторы можно аппроксимировать усилительным звеном, если в качестве входной величины рассматривать скорость вращения вала его ротора и идеальным дифференцирующим – если угол поворота вала ротора.

Этапы расчета асинхронных тахогенераторов

При расчете асинхронных тахогенераторов следует учитывать назначение проектируемой машины, так как выбор активных и конструктивных материалов, величин электромагнитных нагрузок, технологии изготовления различны для интегрирующих и демпфирующих тахогенераторов.

В качестве расчетного режима принимают режим работы при неподвижном роторе и разомкнутой генераторной обмотке.

При проектировании асинхронных тахогенераторов выделяют три этапа расчета:

1) Выбор оптимальной геометрии магнитопровода и допустимых величин электромагнитных нагрузок тахогенераторов.

2) Ориентировочный расчет основных величин, определяющих рабочие свойства тахогенераторов.

3) Проверочный расчет и уточнение параметров и величин, характеризующих тахогенератор.

5.2. Импульсные тахометры угловой скорости

На рис. 5.4 изображена схема датчика с изменяемым магнитным сопротивлением.

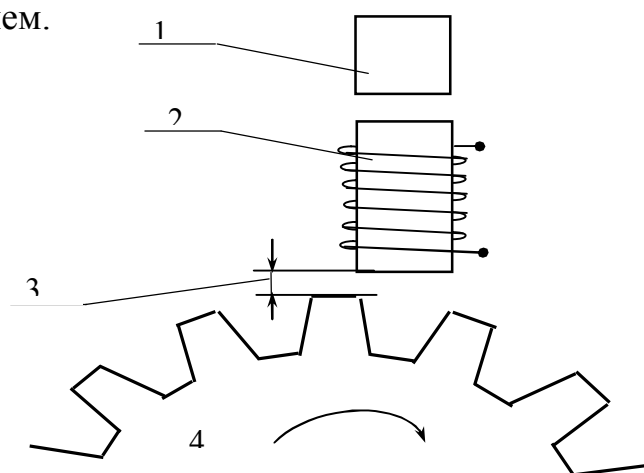


Рис. 5.4. Схема датчика с изменяемым магнитным сопротивлением:
1 – постоянный магнит; 2 – полюс; 3 – зазор; 4 - шестерня

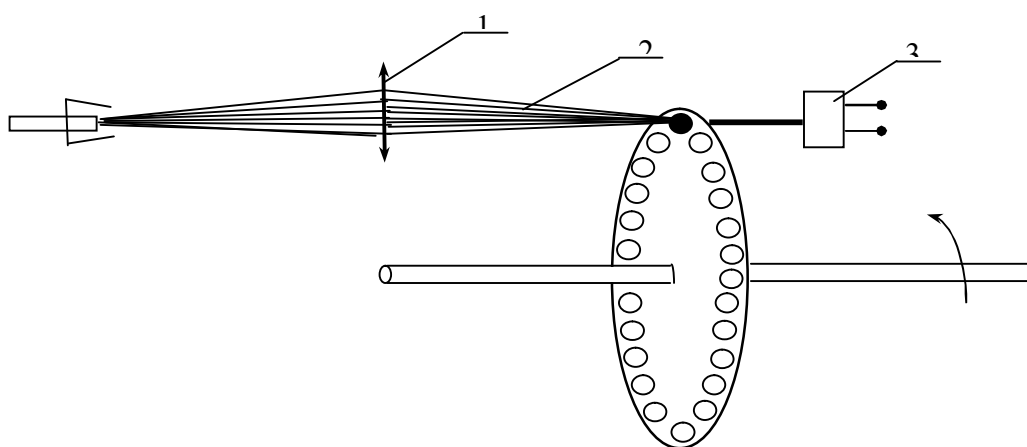


Рис. 5.5. Схема оптического тахометра:
1 – линза; 2 – световой пучок; 3 – оптический приемник

Измерительная катушка 2 снабжена магнитным сердечником, на который воздействует магнитное поле постоянного магнита 1. Катушка 2 помещена перед диском с зубцами 4. Последовательность скачков магнитных свойств (зубья, щели) диска вызывает периодическое изменение магнитного сопротивления в магнитной цепи катушки. Частота наведения в катушке ЭДС пропорциональна скорости вращения диска. Амплитуда ЭДС зависит от величины зазора 3 (с увеличением зазора ЭДС уменьшается) и скорости вращения диска (при малой скорости амплитуда ЭДС может быть меньше порога чувствительности датчика).

На рис. 5.5 изображена схема оптического тахометра, состоящего из источника света ИС (слева) и оптического приемника ОП 3 (ФД или ФТ). Вращающееся тело снабжено отражающими метками, расположенными равномерно по окружности. На тело направлен световой пучок 2. Вращающееся тело помещено между ИС и ОП. Фотоприемник 3 получает модулированный изменениями отражения или пропускания световой поток и выдает электрический сигнал с частотой, пропорциональной скорости вращения тела, и с амплитудой, не зависящей от этой скорости.

Диапазон измеряемых скоростей зависит от числа скачков оптических свойств (риски, щели), от полосы пропускания приемника и связанной с ним электрической схемы.

Для измерения малых скоростей (0,1 об/мин) используют диски с большим числом щелей (от 500 до нескольких тысяч), для измерения больших скоростей ($10^5 - 10^6$ об/мин) – диски с одной щелью. Скорость вращения определяется верхней граничной частотой электрической цепи.

5.3. Индукционные датчики

Индукционные датчики предназначены для преобразования скорости линейных и угловых перемещений в ЭДС. Они относятся к датчикам генераторного типа. Принцип действия основан на явлении электромагнитной индукции. Выходным сигналом индукционных датчиков является ЭДС, величина которой пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего витки катушки. Это изменение происходит за счет перемещения катушки в постоянном магнитном поле или за счет вращения ферромагнитного индуктора относительно неподвижной катушки.

В индукционных датчиках в отличие от индуктивных создается постоянное магнитное поле (с помощью постоянного магнита или катушки, питаемой постоянным напряжением).

На рис. 5.6 приведена схема датчика с подвижной катушкой, используемого для измерения малых перемещений (нескольких миллиметров) детали. Магнит 3 неподвижен (жестко закреплен), катушка 2 перемещается, так как закреплена на движущейся детали 1. Относительное их перемещение наводит в катушке ЭДС, величина которой пропорциональна скорости движения детали:

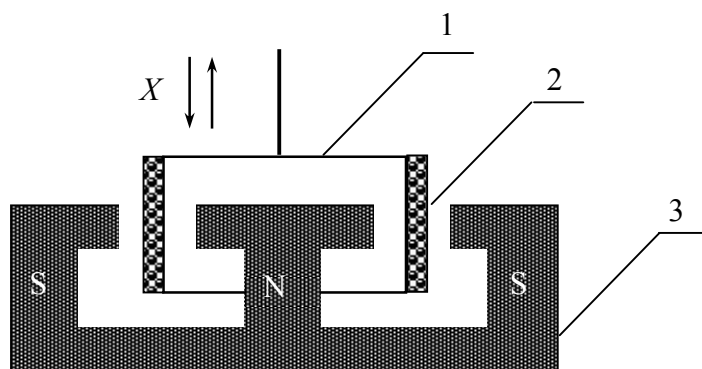


Рис. 5.6. Индукционный датчик скорости линейных перемещений с подвижной катушкой и постоянным магнитом:
1 – деталь; 2 – катушка; 3 – постоянный магнит

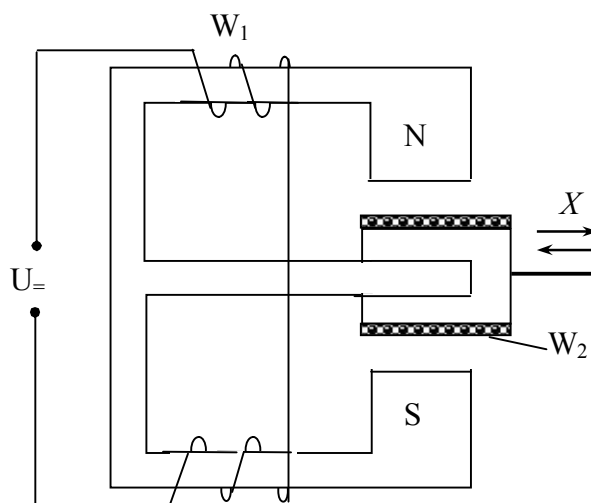


Рис. 5.7. Индукционный датчик скорости линейных перемещений с подвижной катушкой и электромагнитом постоянного тока:

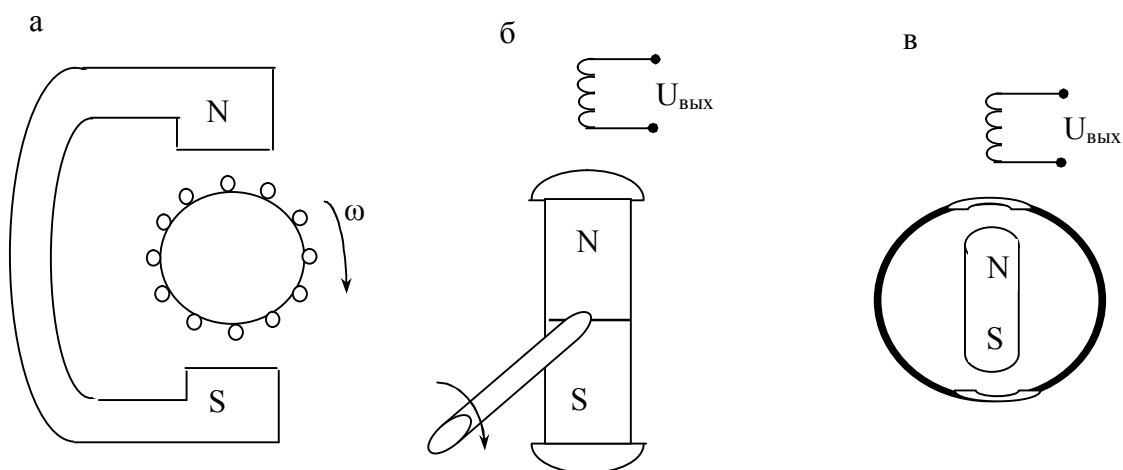


Рис. 5.8. Индукционные датчики скорости угловых перемещений:
а) с постоянным магнитом с полюсными наконечниками; б) с неподвижной катушкой; в) с ферромагнитным кольцом в зазоре

$$e = 2\pi r \cdot W \cdot B \cdot V = l \cdot B \cdot V,$$

где r , W – соответственно радиус и число витков катушки;
 l – длина проволоки катушки:

$$l = 2\pi r \cdot W;$$

B – величина индукции поля тороидального магнита, Тл;
 V – скорость перемещения катушки, м/с.

На рис. 5.7 представлена конструктивная схема индукционного датчика, в котором постоянное магнитное поле, создается катушкой с числом витков W_1 , питаемой постоянным напряжением. При перемещении катушки с числом витков W_2 , размещенной в воздушном зазоре, в ней индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости перемещения.

Для измерения более значительных перемещений (до 0,5 м) используется датчик, конструктивная схема которого приведена на рис. 5.8. Магнит 2 укреплен на движущейся детали и перемещается вдоль оси двух катушек 1. ЭДС, наведенная в катушке при перемещении магнита, пропорциональна скорости его перемещения. Катушки соединены последовательно и встречно.

6. ДАТЧИКИ УСКОРЕНИЙ И ВИБРАЦИЙ

Основными конструктивными элементами этих датчиков являются масса, упругие элементы, демпфирующие устройства и выходные органы. В качестве упругих элементов используются стержни, консоли, струны, балки, пружины, мембраны, выполненные из стали, фосфора, бериллиевой бронзы и других сплавов. В качестве демпфирующих элементов используются жидкостные и воздушные демпферы, индукционные демпферы, прокладки из резины, пружины, демпферы с сухим трением. В качестве выходных преобразователей применяются пьезоэлементы, угольные столбики, омические тензодатчики, индуктивные и емкостные датчики перемещений.

Акселерометры

Для измерения постоянных ускорений с погрешностью 1 – 5% используются датчики прямого преобразования маятникового и пружинного типа. Маятниковые акселерометры используются для измерения ускорений, меньших 1 м/с^2 , так как при больших ускорениях угол отклонения маятника возрастает, что приводит к погрешности.

На рис. 6.1 представлена принципиальная схема пружинного реостатного датчика ускорений. Масса 2 подвешена на пружинах 1. При наличии вертикального ускорения под действием силы инерции движок 3, связанный с массой 2, перемещается по реостату 4. Выходное напряжение пропорционально действующему ускорению.

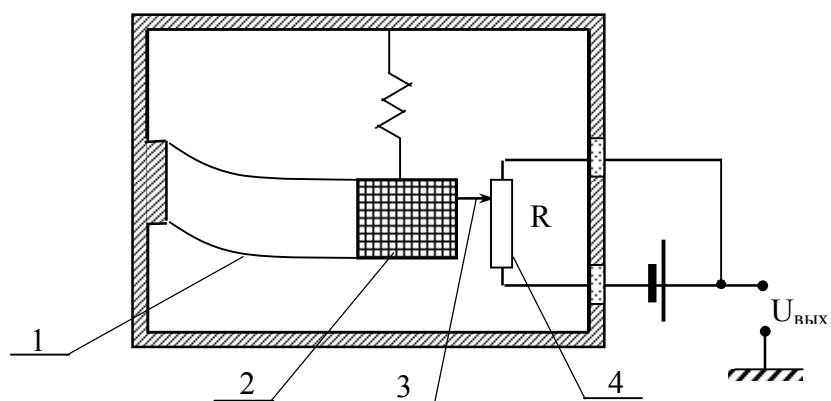


Рис. 6.1. Схема пружинного реостатного акселерометра:
1 – пружины; 2 – масса; 3 – движок; 4 - реостат

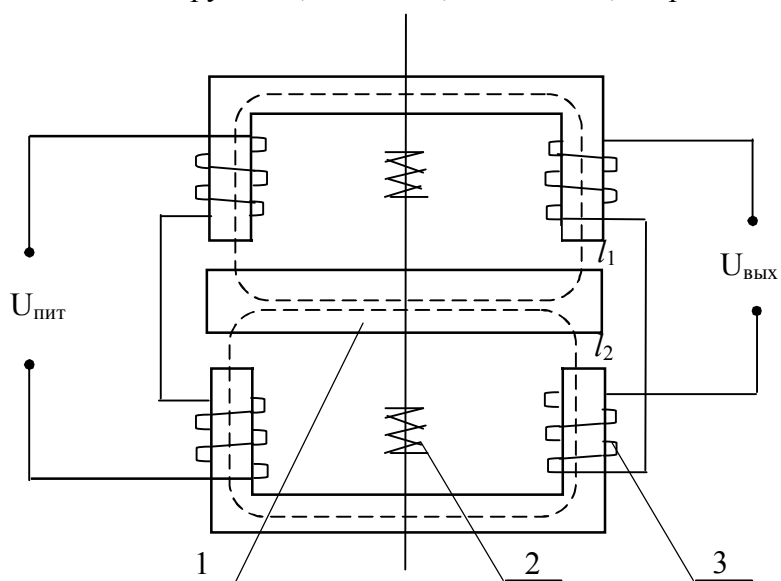


Рис. 6.2. Схема индуктивного акселерометра:
1 – масса; 2 – пружины; 3 – вторичные катушки

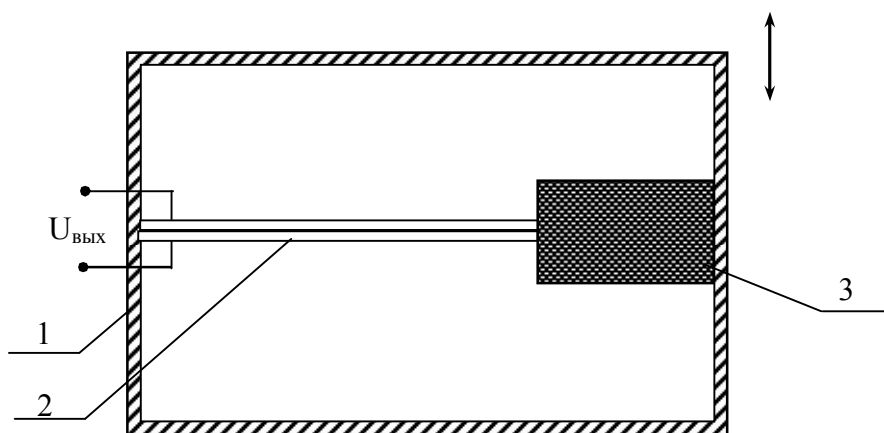


Рис. 6.3. Схема пьезоэлектрического акселерометра консольной формы:
1 - корпус; 2 – пьезоэлектрические пластины; 3 - чувствительная масса

На рис. 6.2 приведена схема индуктивного акселерометра. Сейсмическая масса 1 перемещается между двумя сердечниками, их первичные обмотки питаются одинаковым напряжением переменного тока. Образуются две магнитные цепи с зазорами l_1 и l_2 , которые изменяются при перемещении массы. Измеряемое ускорение пропорционально перемещению массы и определяется напряжением на выводах вторичных катушек, включенных дифференциально.

На рис. 6.3 изображена схема пьезоэлектрического акселерометра консольной формы. Корпус 1 крепится к объекту измерения и перемещается вместе с ним. На чувствительную массу 3 через пьезоэлектрические пластины 2 действует сила, определяемая движением объекта. Величина перемещения массы 3 зависит от соотношения между массой и упругостью пластин, от характера движения. Сила инерции массы вызывает ее отклонение, пропорциональное ускорению.

Акселерометры с контактными преобразователями (предельные акселерометры или сигнализаторы перегрузок) применяют в случаях, когда величина ускорения не должна превышать заданного предельного значения.

Для измерения длительно действующих малых и меняющихся с частотой в сотни Герц ускорений используют интегрирующие струнные акселерометры, выходной сигнал которых представляет последовательность импульсов, частота которых пропорциональна ускорению.

Виброизмерительные устройства

Для измерения виброускорений применяются те же датчики, что и для измерения ускорений поступательного движения.

Большинство датчиков виброизмерительных приборов содержит инерционные преобразователи: сейсмический для измерения линейных параметров или гироскопический для измерения угловых параметров.

На рис. 6.4 приведена структурная схема универсального виброизмерительного устройства для измерения вибрационных перемещений, скоростей и ускорений.

Сигнал сейсмического вибродатчика 1 с индукционным преобразователем поступает через интегрирующую ИЦ 3 или дифференцирующую ДЦ 4 цепи или непосредственно в усилитель 5, на выход которого подключен вибратор 6 осциллографа. Частота свободных колебаний датчика составляет 5-7 Гц. В диапазоне частот свыше 10 Гц датчик работает в режиме виброметра и его выходной сигнал пропорционален скорости виброперемещений. Выбор измеряемого параметра осуществляется с помощью переключателя 2. Прибор имеет три канала, обеспечивающих работу в диапазоне частот 10 – 500 Гц при коэффициенте преобразования 70 мА/В по сигналу; $24 \cdot 10^3$ мА/В·с – по интегралу входного сигнала и $175 \cdot 10^{-3}$ мА·с/В – по производной входного сигнала при сопротивлении нагрузки 1 Ом.

Для измерений инфранизкочастотных виброперемещений большой амплитуды (транспортная вибрация) используется маятниковый виброметр. Механическая часть этого прибора представлена на рис. 6.5 и представляет собой коромысло, которое может вращаться вокруг оси. На одном из плеч коромысла на расстоянии l от оси находится неуравновешенный груз массой m . Эта система удерживается в горизонтальном положении пружиной с удельным моментом W . Если основание (корпус) датчика колеблется в вертикальном направлении, то движение коромысла относительно корпуса рассматривается, как вызванное силой инерции неуравновешенной массы. Из уравнения моментов, возникающих в системе, находят линейное перемещение груза.

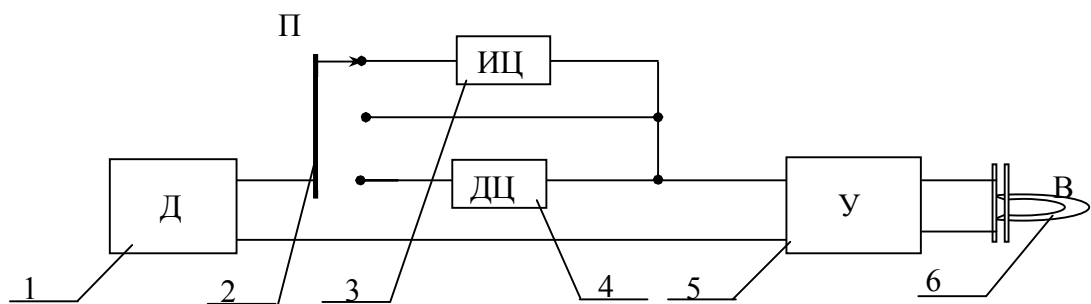


Рис. 6.4. Структурная схема универсального виброизмерительного устройства для измерения вибрационных перемещений, скоростей и ускорений:
 1 – датчик; 2 – переключатель; 3 – интегрирующая цепь; 4 – дифференцирующая цепь; 5 – усилитель; 6 – вибратор осциллографа

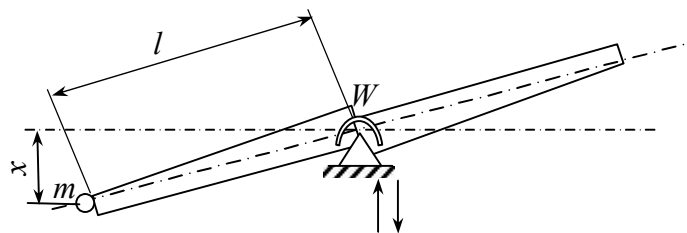


Рис. 6.5. Механическая часть маятникового виброметра для измерений инфранизкочастотных виброперемещений большой амплитуды:
 m – груз; W – удельный момент пружины, удерживающей коромысло с грузом

7. ДАТЧИКИ НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ

При определенных условиях эксплуатации в конструкциях возникают механические напряжения, знание которых необходимо для обеспечения надежности функционирования данной конструкции. Напряжения в материале вызывают его деформацию. По измеренному значению деформации можно определить вызвавшие ее напряжения.

В области упругих деформаций справедлив закон Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\Delta l}{l},$$

где σ – напряжения в материале, Н/м²;

E – модуль упругости материала – максимальное напряжение, не вызывающее остаточных деформаций, Н/м²;

ε – деформация;

Δl – линейное удлинение, м;

l – первоначальный размер, м.

Для измерения деформации часто используют резисторные (тензометрические) датчики, которые приклеиваются на образец и деформируются вместе с ним. Работают на постоянном и переменном токах.

Резисторные датчики являются пассивными, так как преобразуют в изменение сопротивления собственную деформацию, практически равную деформации образца в области закрепления датчика.

Тензометрические датчики служат для измерения деформации и механического напряжения в деталях машин и механизмов. Они могут использоваться для измерения других механических величин (давлений, вибрации, ускорений), которые предварительно преобразуются в деформацию.

В качестве чувствительного материала тензодатчиков используют проводники и полупроводники.

7.1. Проволочные тензодатчики

Принцип работы проволочного тензодатчика основан на изменении активного сопротивления проволоки при ее механической деформации. Изменение активного сопротивления проволоки при деформации вызывается изменением ее сечения и длины, а также изменением удельного сопротивления материала. Датчик на детали располагают в направлении действия деформирующего усилия.

На рис. 7.1 представлена конструктивная схема проволочного тензодатчика. На полосу тонкой прочной бумаги или пластика наклеен уложенный зигзагообразно нитевидный проводник. К концам проводника с помощью пайки или сварки присоединены выводы из медной фольги, с помощью которых датчик подключен в измерительную цепь.

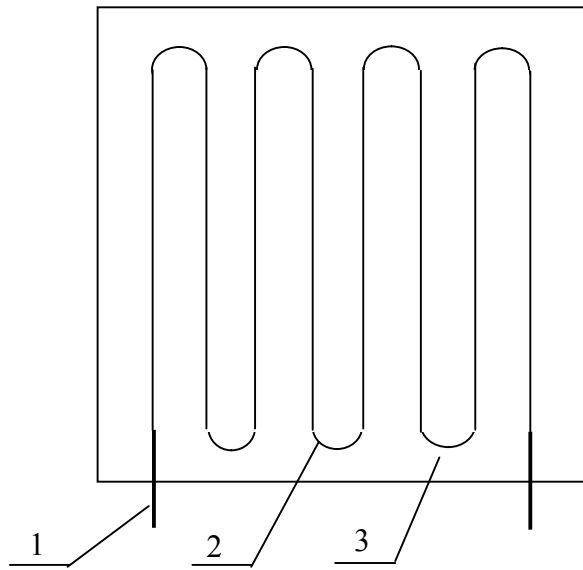


Рис. 7.1. Конструктивная схема проволочного тензодатчика:
1 – выводы; 2 – проволока; 3 – бумага

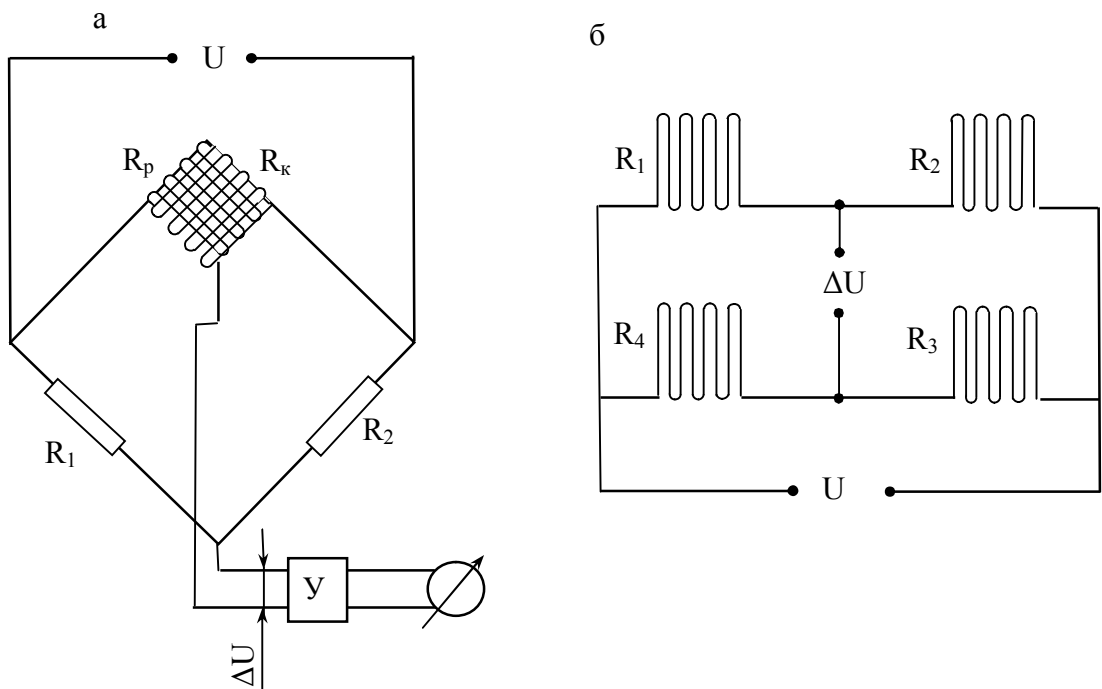


Рис. 7.2. Мостовые схемы включения тензодатчиков:
а) с компенсацией температурной погрешности;
б) повышенной чувствительности

Сверху проводник защищен тонкой бумагой. Количество нитевидных проводников составляет $10 \div 20$. Диаметр проводника 20 мкм, толщина подложки составляет 0,03 мм для пластика и 0,1 мм для бумаги.

Для увеличения чувствительности датчика применяют мостовые схемы с двумя или четырьмя одинаковыми датчиками, наклеиваемыми на испытываемую деталь. Мостовая схема включения тензодатчиков с компенсацией температурной погрешности приведена на рис. 7.2а. На рис. 7.2б показана мостовая схема включения тензодатчиков повышенной чувствительности.

По конструктивным параметрам тензодатчики подразделяются на датчики с малой базой (0,4-4 мм), со средней (4-25 мм), с большой базой. Активное сопротивление датчиков составляет соответственно 5-100 Ом, 100-400 Ом; до 1000 Ом. Ширина датчиков от 3 до 60 мм. Длина выводов составляет 20-80 мм.

В таблице Е приложения даны характеристики сплавов проволоочных тензодатчиков.

7.2. Фольговые, пленочные, угольные, полупроводниковые тензодатчики

Фольговые тензодатчики изготавливают методом фотохимического травления. Решетка их выполняется из разных сплавов (медь с никелем, серебро с золотом), которые обеспечивают достаточную чувствительность и надежное сцепление с изоляционной основой. Фотохимический способ позволяет выполнить любой рисунок решетки. Пленочные тензодатчики изготавливают путем напыления слоя германия, теллура, висмута, сульфида цинка на эластичное изоляционное основание из слюды или кварца. Фольговые и пленочные тензодатчики имеют решетку прямоугольного сечения с очень большим отношением ширины к высоте. Большая площадь соприкосновения токопроводящих полосок датчика с деталью обеспечивает хорошие условия теплоотдачи, что позволяет в фольговых датчиках повысить плотность тока в несколько раз, а в пленочных – в десятки раз. Большая площадь сечения плоской полосы обеспечивает увеличения порога чувствительности и точности измерения. Чувствительность пленочных датчиков достигает 50. Надежность пайки выводов обеспечивается большим сечением концов решетки. Толщина проводящего покрытия фольговых датчиков 3-15 мкм. Сопротивление составляет 30-300 Ом.

Фольговые тензодатчики используют для измерения линейных перемещений (рис. 7.3), деформации в двух взаимно перпендикулярных направлениях, для измерения давления.

Угольные датчики используют для измерения механических усилий и напряжений. Принцип действия их основан на зависимости активного сопротивления угольных или графитовых контактов от силы контактного сжатия. На рис. 7.4 показано устройство угольных датчиков.

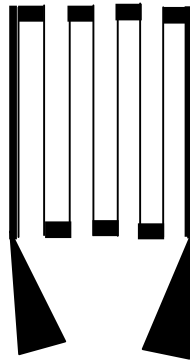


Рис. 7.3. Фольговый тензодатчик для измерения линейных перемещений

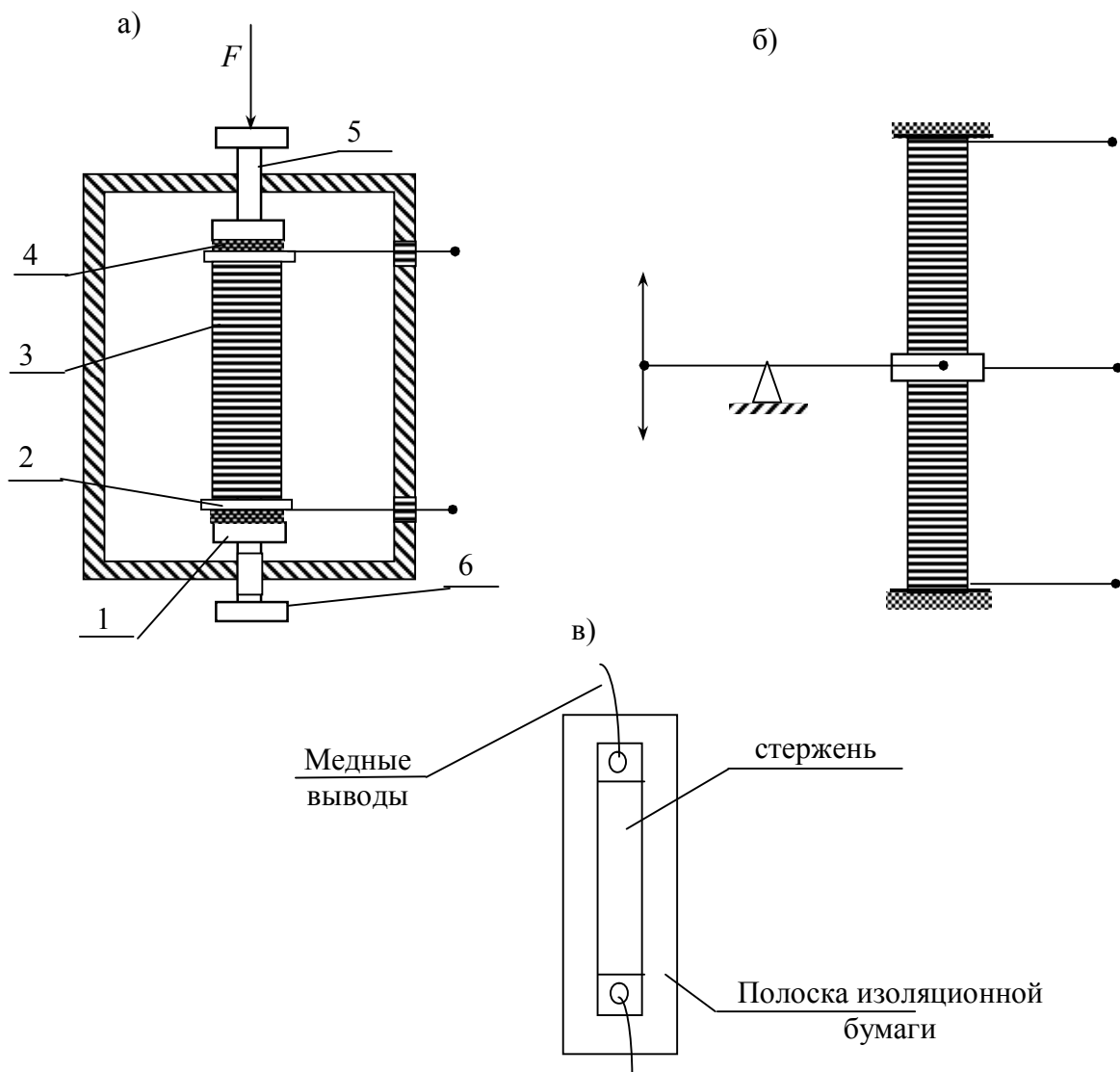


Рис. 7.4. Устройство угольных датчиков:
 а) для измерения усилия; б) реверсивный угольный реостат;
 в) тензолитового типа

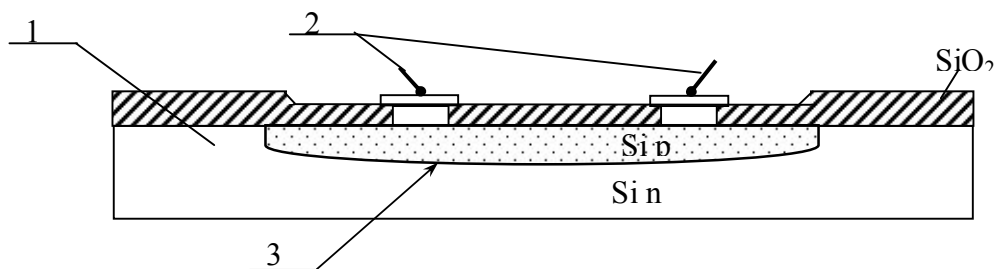


Рис. 7.5. Устройство полупроводникового тензодатчика:
1 – кремниевая подложка; 2 – металлические выводы; 3 – p-n переход

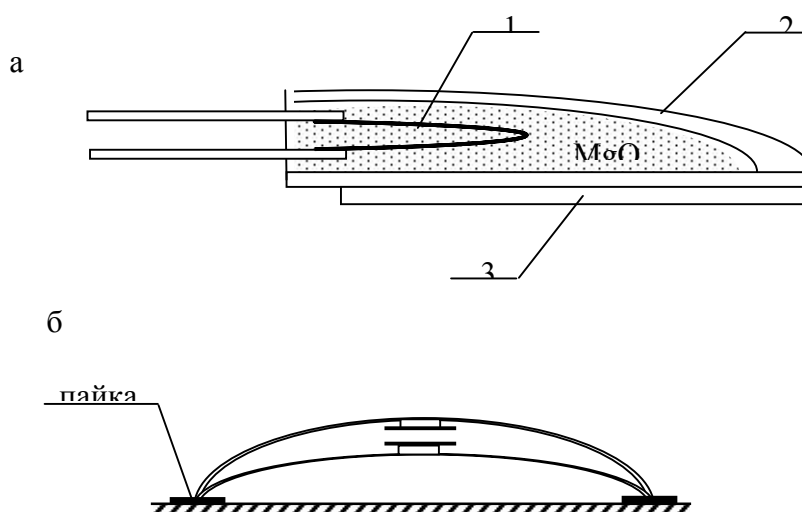


Рис. 7.6. Припаиваемые датчики:
а – резисторный; б – емкостный:
1 – провод; 2 – стальной цилиндр; 3 – образец

Угольные диски 3 зажимаются между прижимным винтом 6 и упором 5, воспринимающим измеряемое усилие F . Давление на угольные диски 3 передается через металлические диски 7, изоляционные прокладки 4 и медные прокладки 2, имеющие выводы для включения датчика в измерительную схему. Активное сопротивление угольного столбика складывается из внутреннего сопротивления диска, определяемого электрическими свойствами материала и не зависящего от усилия F , и переходного контактного сопротивления между дисками, зависящего от свойств материала дисков и усилия F .

Для измерения упругих деформаций используются угольные датчики тензолитового типа, изготовленные из угольного или графитового порошка и сажи, смешанной с изолирующим лаком (бакелит или шеллак). Выполняются в виде стержней диаметром около 1 мм с медными выводами (рис. 7.4в).

Полупроводниковые тензодатчики

Полупроводниковые тензодатчики могут быть выполнены в двух вариантах:

- 1) вырезанные (в виде полоски, вырезанной механически или фотохимически из монокристалла легированного кремния);
- 2) диффузионные (диффузией добавок в какой-то части монокристалла предварительно легированного кремния; фосфора для проводимости n -типа, галлия, индия для проводимости p -типа).

Устройство полупроводникового тензодатчика показано на рис. 7.5. Среды с разной проводимостью образуют диод, поляризация которого должна возникать в направлении запирания (область p должна находиться под отрицательным потенциалом относительно n -области), чтобы изолировать датчик от подложки. Вся структура покрывается защитным слоем двуокиси кремния, сквозь который осуществляется контакт проводящего элемента датчика с металлическими выводами.

Преимущества полупроводниковых датчиков:

- 1) хороший механический и тепловой контакт между образцом и датчиком;
- 2) равенство коэффициентов линейного расширения материалов подложки и проводящего элемента датчика позволяет избежать эффекта разностного расширения;
- 3) образец, являясь монокристаллом, обладает совершенной упругостью, не подвержен гистерезису, может иметь высокую частоту собственных колебаний.

Особенности полупроводниковых датчиков:

- 1) с увеличением количества примесей падает чувствительность датчиков, но уменьшается нелинейность статической характеристики;
- 2) с увеличением количества примесей уменьшается термочувствительность, что позволяет расширить температурную область применения;
- 3) с увеличением количества примесей падает чувствительность к различным излучениям;
- 4) чувствительность полупроводниковых пьезорезистивных датчиков в 50 раз выше, чем металлических;
- 5) нелинейность статической характеристики;
- 6) высокая стоимость.

Многоэлементные датчики (розетки) используются для определения деформаций в нескольких направлениях и представляют собой совокупность проволочных тензодатчиков, размещенных на единой подложке. Направления нитевидных проводников образуют строго определенные уг-

лы. Если направления деформаций не известны, используют розетки из трех датчиков, расположенных под углом 120° .

Экстензометры используют для определения деформаций при повышенных температурах (до 820°C). Применяют припаиваемые резисторные или емкостные датчики (рис. 7.6).

Чувствительный элемент припаиваемого резисторного датчика представляет собой провод 1 из нихрома ($k \approx 2$), заключенный в стальной цилиндр 2, который припаивается к изучаемой конструкции 3. В цилиндре провод удерживается плотным изолирующим порошком (MgO), который обеспечивает электроизоляцию и передачу механических напряжений.

Емкостные экстензометры отличаются повышенной чувствительностью и стабильностью характеристик, применяют при температурах до 650°C .

Емкостный экстензометр состоит из двух металлических лент, изогнутых в виде дуг, наложенных друг на друга и спаянных на концах. На каждой дуге при помощи изолирующей стойки закреплена металлическая пластина. Обе пластины образуют воздушный конденсатор. При деформации конструкции изменяется расстояние между пластинами конденсатора, следовательно, изменяется емкость.

В полупроводниковых тензодатчиках используются кристаллические полупроводниковые материалы: германий, кремний, соединения индия, галлия; а также полупроводниковые аморфные композиции, состоящие из связующих веществ (бакелит, канифоль), наполнителя (мел, тальк), проводящего вещества (графит, уголь, сажа).

7.3. Магнитоупругие датчики

Принцип действия магнитоупругих датчиков основан на изменении магнитной проницаемости ферромагнитного материала при упругих деформациях от механических напряжений в нем. Зависимость магнитной проницаемости от механических напряжений имеет нелинейный характер.

Магнитоупругие датчики используют для измерения силовых параметров: усилий, давлений, крутящих и изгибающих моментов, механических напряжений и деформации.

Конструктивно датчик представляет собой замкнутый магнитопровод, деформирующийся под действием внешних усилий, с одной или несколькими катушками индуктивности (рис. 7.7). Если к магнитопроводу приложено механическое усилие, то магнитная проницаемость магнитопровода изменяется, следовательно, изменяется его магнитное сопротивление и индуктивность обмотки.

Магнитоупругие свойства характеризуются относительной чувствительностью по деформации S и по механическому напряжению S_σ . Чувствительность по деформации может достигать $200 \div 300$.

Магнитоупругие датчики могут быть использованы в виде одинарных, трансформаторных и дифференциально-трансформаторных (рис. 7.7).

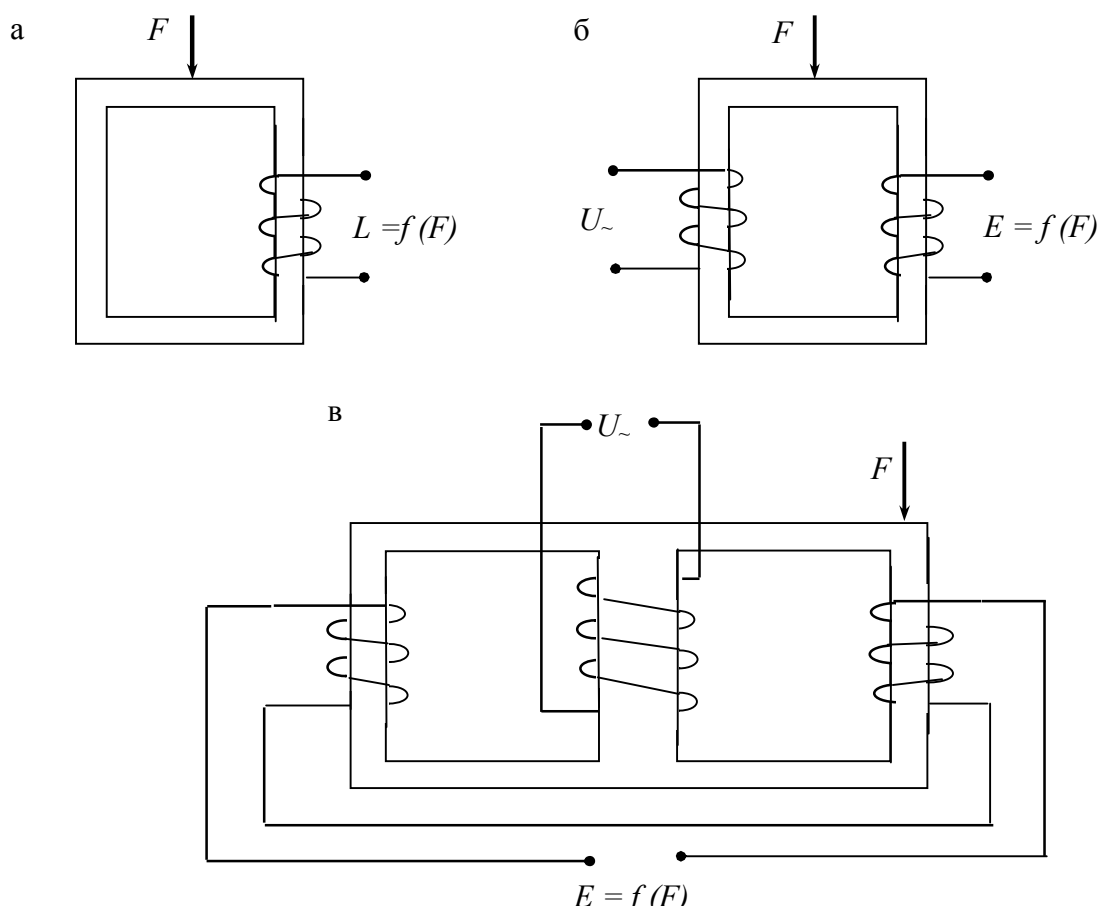


Рис. 7.7. Магнитоупругие датчики:
а – одинарный; б – трансформаторный; в – дифференциально-трансформаторный

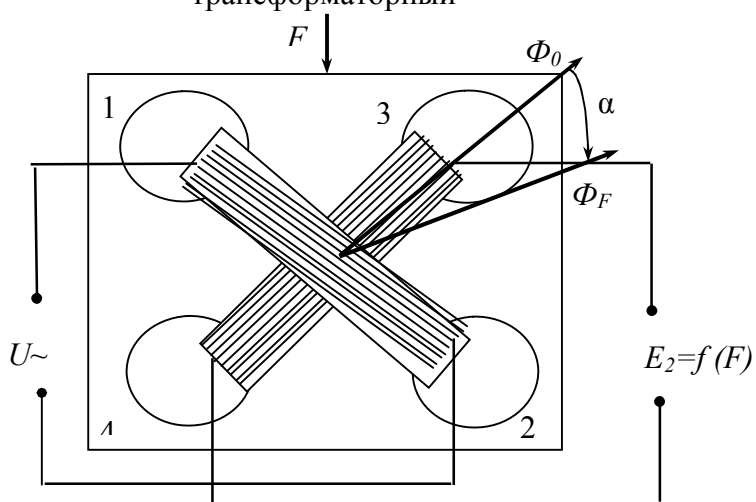


Рис. 7.8. Схема магнитоупругого тензометра:
1 – 4 – отверстия для намотки взаимно перпендикулярных обмоток

В качестве материала магнитопровода применяют ферриты, никель, пермаллой, сплавы никеля. Магнитопроводы, работающие на сжатие в продольном направлении, выполняют сплошными и шихтованными. Шихтованные обеспечивают повышенную стабильность работы на растяжение.

К достоинствам магнитоупругих датчиков относятся: высокая чувствительность, возможность измерения больших усилий (от нажатия прокатных валков, массы вагонов), большая выходная мощность (на 2÷3 порядка выше, чем у проволочных тензорезисторов). К недостаткам – наличие температурной погрешности (0,5%), гистерезис характеристики (0,5÷1,5%), относительно невысокая точность.

Схема магнитоупругого тензометра приведена на рис. 7.8. Магнитопровод имеет отверстия 1 – 4, в которые наматываются взаимно перпендикулярные обмотки. Первичная обмотка, проходящая через отверстия 1 и 2, при отсутствии механической нагрузки создает магнитный поток Φ_0 , не сцепленный с витками обмотки, проходящей через отверстия 3 и 4. Под действием усилия F , меняется магнитная проницаемость в направлении сжатия, что вызывает изменение направления действия магнитного потока Φ_F . Этот магнитный поток Φ_F сцепляется с витками вторичной обмотки, и на ее выходе наводится ЭДС E_2 .

В таблице Е приложения приведены характеристики сплавов, используемых в проволочных тензодатчиках.

8. ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Все оптические приборы можно разделить на *прямые* и *обратные*. Прямые оптические приборы (приемники излучения) используются для обнаружения источников излучения; для определения интенсивности излучения и для измерения температуры. Обратные нашли широкое применение в качестве различных световых индикаторов.

Совместно прямые и обратные оптические приборы могут быть использованы для измерения расстояния; плотности газов; в качестве модуляторов; в контрольной аппаратуре, для построения функциональных схем различных устройств.

В приемниках излучения происходит преобразование видимых, инфракрасных или ультрафиолетовых излучений в изменение электрической энергии на выходе.

Различают три основных типа приемников излучения (фотоэлементов):

- 1) с внешним фотоэффектом (фотоэлементы);
- 2) с внутренним фотоэффектом (фоторезисторы);
- 3) вентильные, основанные на явлении *p-n*-перехода.

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом представляют собой вакуумные или газонаполненные двухэлектродные лампы, у которых один из электродов – фотокатод – под действием попадающего на него излучения испускает электроны (фотоэлектронная эмиссия), в результате чего изменяются сопротивление фотоэлемента и ток цепи. При этом разные типы катодов имеют неодинаковую чувствительность к излучениям разной длины волны, то есть различную спектральную чувствительность. Также к основным характеристикам фотоэлементов с внешним фотоэффектом относятся интегральная чувствительность и спектральная характеристика.

Интегральная чувствительность равна сумме спектральных чувствительностей, соответствующих всем длинам волн, лежащим в пределах чувствительности фотоэлемента. Чувствительность фотоэлемента измеряется в амперах на ватт.

Спектральной характеристикой называется зависимость чувствительности фотоэлемента от длины волны падающего на него излучения $S_{\lambda}=f(\lambda)$. Эта характеристика имеет один или несколько максимумов.

Вакуумные двухэлектродные фотоэлементы являются практически безынерционными приборами с очень малым темновым током – током, который протекает через фотоэлемент при полном затемнении.

Для увеличения чувствительности фотоэлементов в несколько тысяч раз применяют фотоэлектронные умножители.

В фоторезисторах, в качестве чувствительных материалов которых используются полупроводники – сернистый висмут, сернистый кадмий, под действием внешнего излучения увеличивается число электронов проводимости, в результате чего величина сопротивления полупроводника значительно уменьшается.

Конструктивно фоторезисторы представляют собой нанесенный на стеклянную или керамическую пластинку слой полупроводника с входящими в него гребенкообразными электродами.

Основными недостатками фоторезисторов являются сильная температурная зависимость, высокая относительная величина темнового тока, большая инерционность.

Третий вид фотоэлементов (вентильные фотоэлементы) являются генераторными устройствами, для работы которых не нужны источники питания. Вентильные фотоэлементы пропускают ток только в одном направлении, в них образуется ЭДС определенной полярности величиной до 1 В.

Конструктивно вентильные фотоэлементы содержат металлический дисковый электрод с нанесенным на него слоем полупроводника (сернистый таллий, сернистое серебро, селен), покрытого полупрозрачной пленкой золота, контактирующей со вторым металлическим кольцевым электродом.

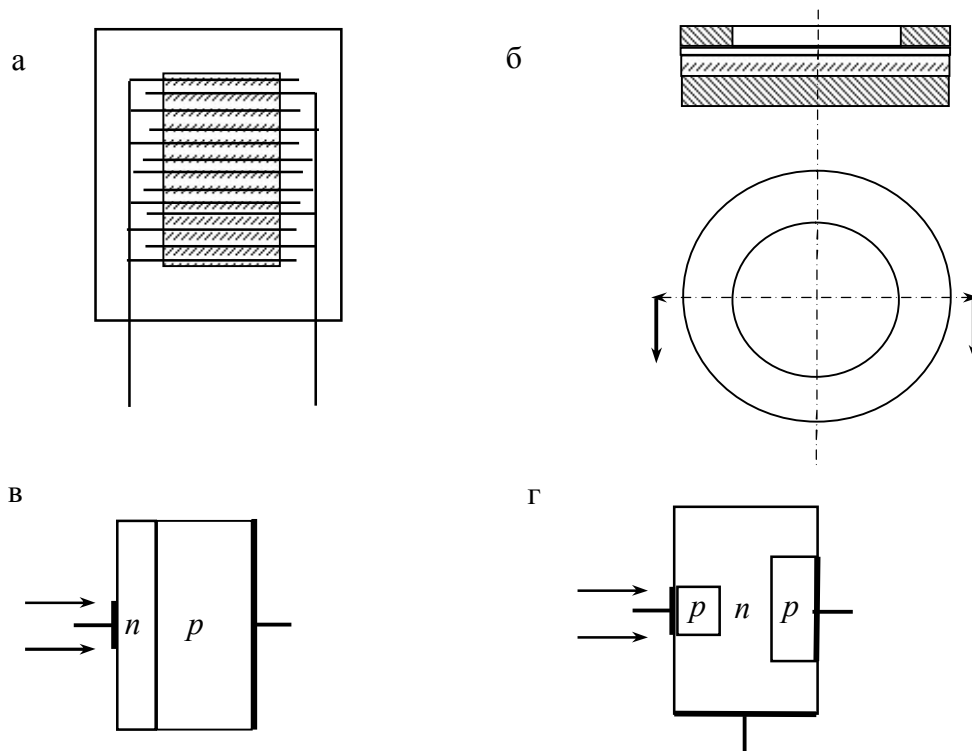


Рис. 8.1. Конструктивные схемы фотоэлементов:
 а – фоторезистора (схематический вид в плане); б – вентильного фотоэлемента (схематический вид в плане и в разрезе); в – фотодиода; г – фототранзистора

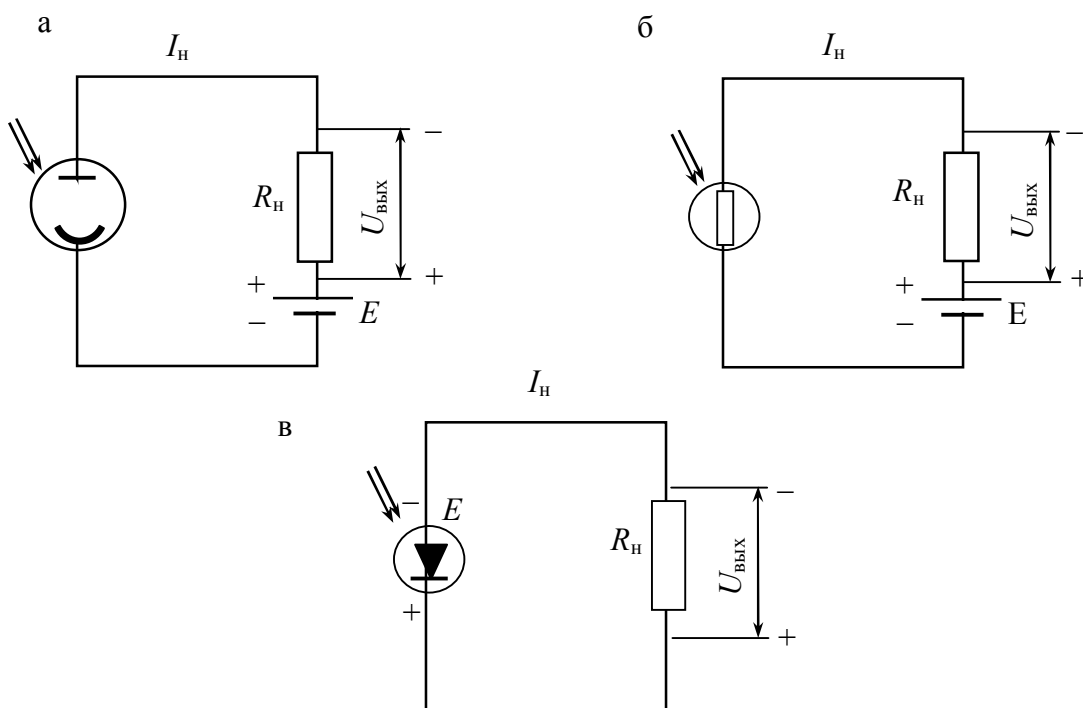


Рис. 8.2. Простейшие схемы включения фотоэлементов:
 а – фотоэлемент с внешним фотоэффектом; б – фоторезистор;
 в – вентильный фотоэлемент

Большое применение получили кремниевые фотоэлементы, изготавливаемые путем диффузии фосфора, сурьмы или бора в монокристалл кремния с *p*- или *n*-проводимостью. Кремниевые фотоэлементы позволяют преобразовывать энергию солнечного излучения с меньшими потерями.

Вентильные фотоэлементы, как и фоторезисторы, очень чувствительны к температуре, инерционны, линейность статической характеристики наблюдается только при слабых излучениях.

Разновидностью вентильных фотоэлементов являются фотодиоды и фототранзисторы.

Конструктивные схемы фотоэлементов приведены на рис. 8.1, схемы включения фотоэлементов – на рис. 8.2.

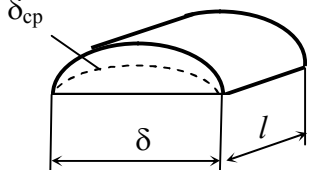
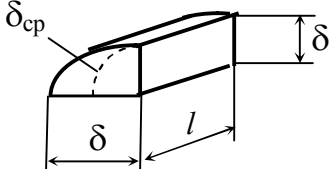
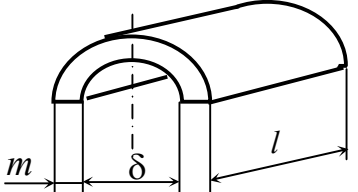
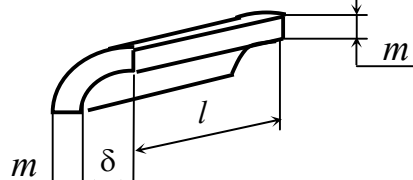
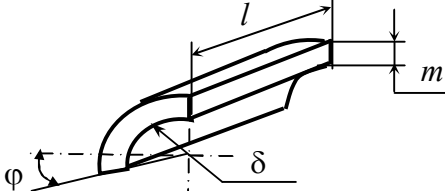
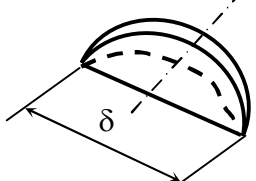
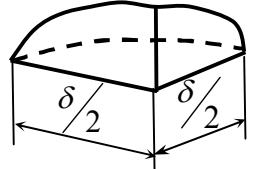
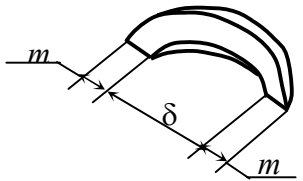
ПРИЛОЖЕНИЕ

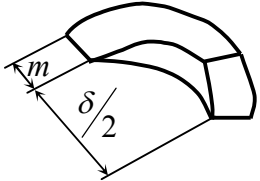
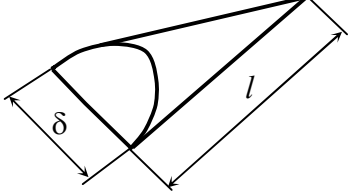
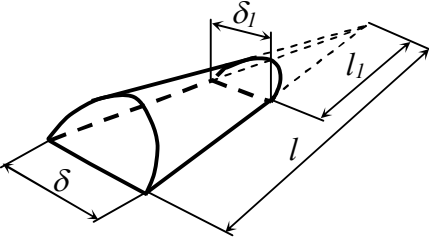
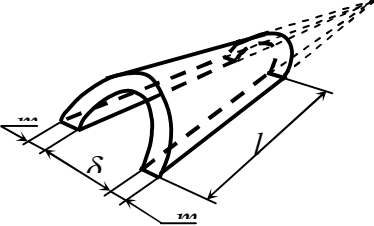
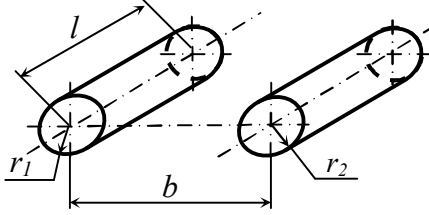
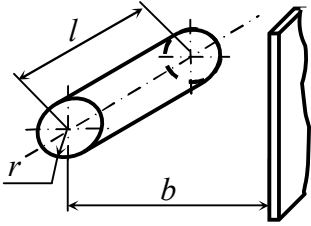
А. ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ РЕОСТАТНЫХ ДАТЧИКОВ

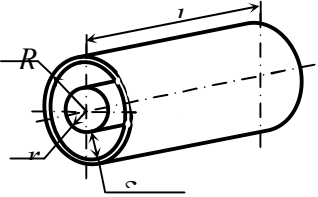
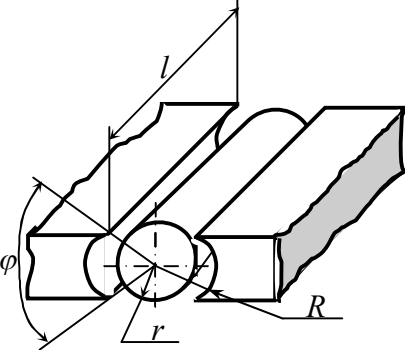
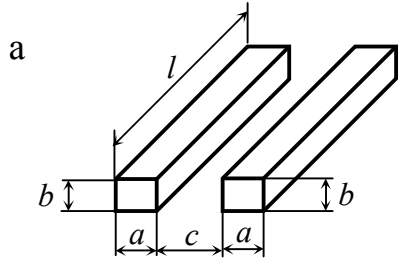
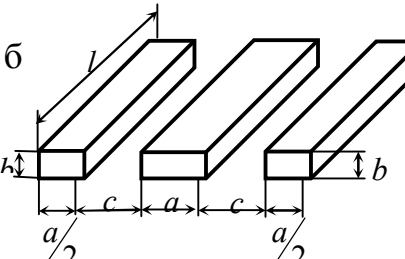
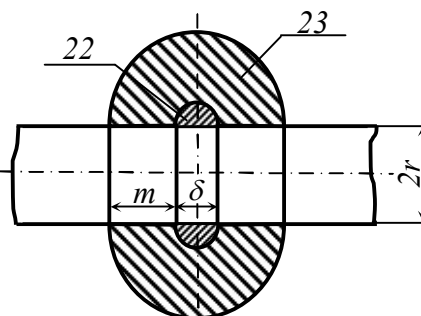
Материал провода	Удельное сопротивление при 20°C, Ом·мм ² /м	Температурный коэффициент сопротивления α, 1/°C	Допустимая температура нагрева, °C
Константан	0,49	$(3\div 4) \cdot 10^{-6}$	500
Манганин	0,42	$6 \cdot 10^{-6}$	960
Нихром	1,08	$(15\div 20) \cdot 10^{-5}$	110
Вольфрам	0,056	$464 \cdot 10^{-5}$	3400
Платинородиевый сплав	0,23	$-111 \cdot 10^{-5}$	1780

Б. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА

№	Эскиз детали магнитопровода и геометрических фигур	Магнитная проводимость, примечание
1		Параллельные плоскости (без учета проводимости краевых потоков) $G_1 = \mu_0 \frac{ab}{\delta} \quad (1)$
2		Параллельные цилиндры (без учета проводимости краевых потоков) $G_2 = \mu_0 \frac{\pi d^2}{4\delta} \quad (2)$
3	 $R_2 = R_1 + a$	Непараллельные плоскости, расположенные под углом (без учета проводимости краевых потоков) $G_3 = \mu_0 \frac{b}{\varphi} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (3)$ $G_3 = \mu_0 \frac{b}{\varphi} \ln \left(1 + \frac{a}{R_1} \right)$ φ – в радианах.
4		Непараллельные плоскости и цилиндр, расположенные под углом (с учетом проводимости краевых потоков) $G_4 = G_0 + G' + G'' \quad (4)$ $G_0 = \frac{2\pi\mu_0 R_0}{\varphi} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{r^2}{R_0^2}} \right] \approx$ $\approx \frac{2\pi\mu_0 R_0^2}{\delta} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{r^2}{R_0^2}} \right];$ $G' = 0,58 \mu_0 (5,14 r + 1,57 \delta);$ $G'' = 2c\mu_0 \left(1 + \frac{4r}{c + 2\delta} \right).$

№	Эскиз детали магнитопровода и геометрических фигур	Магнитная проводимость, примечание
5		Половина цилиндра. Графически $\delta_{cp} = 1,22\delta$ $G_5 = \mu_0 \cdot 0,26 \cdot l$ (5)
6		Четверть цилиндра Графически $\delta_{cp} = 1,22\delta$ $G_6 = \mu_0 \cdot 0,52 \cdot l$ (6)
7		Половина полого цилиндра $\delta_{cp} = \pi \frac{\delta + m}{2}$; $S_{cp} = ml$; $G_7 = \mu_0 \frac{2l}{\pi(\delta/m + 1)}$ (7)
8		Четверть полого цилиндра $G_8 = \mu_0 \frac{2l}{\pi(\delta/m + 0,5)}$ (8)
9		Часть полого цилиндра $\varphi \leq \pi/2$ $G_9 = \mu_0 \frac{2l}{(\pi \pm 2\varphi)(\delta/m + 0,5)}$ (9)
10		Шаровой квадрант $G_{10} = \mu_0 \cdot 0,077\delta$ (10)
11		Половина шарового квадранта $G_{11} = \mu_0 \cdot 0,308\delta$ (11)
12		Квадрант шаровой оболочки $G_{12} = \mu_0 \frac{m}{4}$ (12)

№	Эскиз детали магнитопровода и геометрических фигур	Магнитная проводимость, примечание
13		Половина квадранта шаровой оболочки $G_{13} = \mu_0 \frac{m}{2} \quad (13)$
14		Половина конуса $\delta_{cp} = 0,61\delta; \quad V = \frac{1}{3} \frac{\pi\delta^2}{8} l;$ $G_{14} = \mu_0 \cdot 0,35l \quad (14)$
15		Половина усеченного конуса $\delta_{cp} = 1,22 \left(\frac{\delta + \delta_1}{2} \right) = 0,61(\delta + \delta_1);$ $V = \frac{\pi}{24} [\delta^2 l - \delta_1^2 l_1];$ $G_{15} = \mu_0 \cdot 0,35 \frac{\delta_2 l - \delta_1^2 l_1}{(\delta + \delta_1)^2} \quad (15)$
16		Половина усеченного полого конуса с равномерной толщиной стенок $\delta_{cp} = \pi/4 (\delta + \delta_1 + 2m);$ $S_{cp} = ml;$ $G_{16} = \mu_0 \frac{2l}{\pi \left(\frac{\delta + \delta_1}{2m} + 1 \right)} \quad (16)$
17		Параллельные цилиндры $G_{17} = g_{17} \cdot l \quad (17)$ где $g_{17} = \mu_0 \frac{2\pi}{\ln(k + \sqrt{k^2 - 1})};$ при $r_1 \neq r_2$ при $r_1 = r_2$ $k = \frac{b^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_2}; \quad k = \frac{b^2 - 2r^2}{2r^2};$
18		Цилиндр, параллельный плоскости $G_{18} = g_{18} \cdot l \quad (18)$ где $g_{18} = \mu_0 \frac{2\pi}{\ln \left(\frac{b + \sqrt{b^2 - r^2}}{r} \right)};$

№	Эскиз детали магнитопровода и геометрических фигур	Магнитная проводимость, примечание
19		<p>Концентрические цилиндры</p> $G_{19} = g_{19} \cdot l \quad (19)$ <p>где $g_{19} = \mu_0 \frac{2\pi}{\ln \frac{R}{r}}$; если $r \gg \delta$, то</p> $g_{19} = \mu_0 \frac{2\pi(r + \delta/2)}{\delta};$
20		<p>Цилиндр и концентрические поверхности (без учета проводимости краевого потока)</p> $G_{20} = g_{20} \cdot l \quad (20)$ <p>где $g_{20} = \mu_0 \frac{\varphi}{\ln R/r}$;</p> <p>если $r \gg \delta$, то $g_{20} = \mu_0 \frac{\varphi(r + \delta/2)}{2\delta}$</p>
21	<p>а</p>  <p>б</p> 	<p>Прямоугольные параллельные стержни:</p> <p>а) $G_{21a} = g_{21a} \cdot l \quad (21a)$</p> <p>где $g_{21a} = \mu_0 \left(\frac{b}{c} + \frac{2a}{c + \pi a/2} \right)$;</p> <p>б) $G_{21б} = g_{21б} \cdot l \quad (21б)$</p> <p>где $g_{21б} = 2\mu_0 \left(\frac{b}{c} + \frac{a}{c + \pi a/4} \right)$;</p>
22 23		<p>Тело вращения</p> $G_{22} = \mu_0 \cdot 1,63r \quad (22)$ $G_{23} = \mu_0 \frac{4r}{m/\delta + 1} \quad (23)$ $m = (1 \div 2)\delta$

В. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОВОДОВ ИНДУКТИВНЫХ ДАТЧИКОВ

Таблица В1 – Характеристики проводов марок ПЭТимид и ПНЭТимид

<i>d, мм</i>	<i>ПЭТимид</i>				<i>ПНЭТимид</i>			
	<i>d₁, мм</i>	<i>ω₀</i>	<i>c₀</i>	<i>k₃</i>	<i>d₁, мм</i>	<i>ω₀</i>	<i>c₀</i>	<i>k₃</i>
0,025	0,035	641	71,8	0,314	-	-	-	-
0,030	0,045	395	30,75	0,276	0,045	395	30,75	0,276
0,035	0,050	326	18,65	0,314	0,050	326	18,65	0,314
0,040	0,055	274	11,63	0,34	0,055	274	11,63	0,344
0,045	0,060	234	8,10	0,371	0,060	234	8,10	0,371
0,050	0,065	202	5,66	0,396	0,065	202	5,66	0,396
0,060	0,080	138	2,68	0,391	0,080	138	2,68	0,391
0,070	0,090	112	1,605	0,433	0,090	112,5	1,605	0,433
0,080	0,105	85	0,93	0,428	0,105	85	0,93	0,428
0,090	0,115	73	0,63	0,464	0,115	73	0,63	0,464

Таблица В2 – Характеристики проводов марки ПЭТВр

<i>d, мм</i>	<i>d₁, мм</i>	<i>ω₀</i>	<i>c₀</i>	<i>k₃</i>
0,020	0,035	631	110,5	0,198
0,025	0,040	491	55,0	0,241
0,030	0,045	395	30,75	0,276
0,035	0,050	326	18,65	0,314
0,040	0,055	274	11,63	0,344
0,045	0,060	234	8,10	0,371
0,050	0,065	202	5,66	0,396
0,060	0,085	123	2,39	0,345
0,070	0,095	101	1,44	0,388
0,080	0,105	85	0,93	0,428
0,090	0,115	73	0,63	0,464
0,10	0,125	63,6	0,446	0,501
0,11	0,135	54,9	0,317	0,520
0,12	0,145	47,6	0,231	0,538
0,13	0,155	41,7	0,173	0,553
0,14	0,165	36,7	0,131	0,565
0,15	0,18	30,9	0,096	0,546
0,16	0,19	27,7	0,0759	0,557
0,17	0,20	25,0	0,0606	0,567
0,18	0,21	22,7	0,0491	0,577
0,19	0,22	20,7	0,0401	0,586
0,20	0,23	18,9	0,0331	0,594

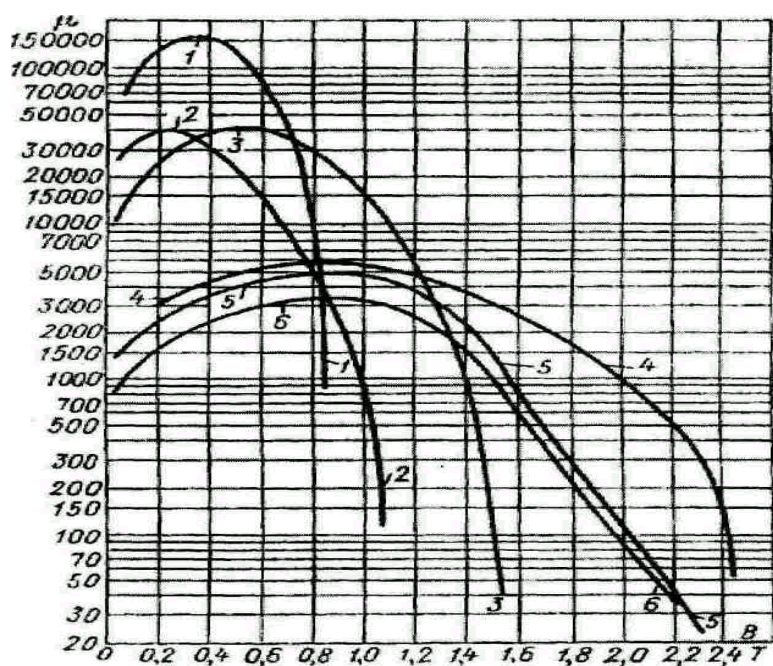


Рис. В.1. Кривые относительной магнитной проницаемости магнитомягких материалов:
 1 – высоконикелевый пермаллой марки 79НМ; 2 – низконикелевый пермаллой марки 50НХС; 3 – низконикелевый пермаллой марки ЗОН; 4 – пермендюр;
 5 – сталь низкоуглеродистая электротехническая марки Э, отожженная;
 6 – сталь качественная конструкционная марки 10

Г. ПАРАМЕТРЫ ТЕРМОПАР И ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ

Таблица Г1 – ТермоЭДС материалов для термопар в паре с платиной (температура рабочего спая 100 °С, температура холодного спая 0°С)

Материал	ТермоЭДС, мВ	Материал	ТермоЭДС, мВ
Платина	0	Платинородий (10% родия)	+0,64
Кремний	+44,8	Вольфрам	+0,8
Хромель	+2,95	Молибден	+1,3
Железо	+1,8	Алюмель	+1,15
Медь	0,76	Копель	-4,0

Таблица Г2 – Зависимость термоЭДС от температуры (при температуре свободных концов 0 °С)

Температура, °С	ТермоЭДС, мВ		
	Термопара платинородий – платина	Термопара хромель – алюмель	Термопара хромель – копель
-50	-	-	-3,11
-20	-0,109	-0,77	-1,27
0	0	0	0
50	0,301	2,02	3,35

Температура, °С	ТермоЭДС, мВ		
	Термопара платиnorodий – платина	Термопара хромель – алюмель	Термопара хромель – копель
100	0,64	2,02	6,95
200	1,42	0,13	14,56
300	2,311	12,21	22,91
400	3,244	16,4	31,49
500	5,214	24,91	49,02
800	7,323	33,32	-
1000	9,589	41,32	-
1100	10,745	45,16	-
1300	13,152	-	-
1500	15563	-	-

Таблица Г3 – Зависимость сопротивления терморезистора от температуры

Температура, °С	Сопротивление, Ом				
	Платиновые термометры сопротивления			Медные термометры сопротивления	
	20(10 Ом)	21(46 Ом)	22(100 Ом)	23(53 Ом)	24(100 Ом)
-200	1,73	7,95	17,28	-	-
-150	3,88	17,85	38,80	-	-
-100	5,97	27,44	59,65	-	-
-50	8,00	36,80	80,00	41,71	78,70
-30	8,8	40,50	88,04	46,23	87,22
-10	9,6	44,17	96,03	50,74	95,74
0	10,0	46,00	100,00	53,00	100,00
20	10,79	46,94	107,91	57,52	108,52
40	11,58	53,26	115,78	62,03	117,04
60	12,36	56,86	123,60	66,55	125,56
80	13,14	60,43	131,37	71,06	134,08
100	13,91	63,99	139,10	75,58	142,60
120	14,68	67,52	146,78	80,09	151,12
140	15,44	71,03	154,41	84,51	159,64
160	16,20	74,52	162,00	89,13	168,16
180	16,95	77,99	169,54	93,64	176,68
300	21,38	98,34	213,79	-	-
400	24,94	114,72	249,38	-	-
500	28,38	130,55	283,80	-	-
600	31,70	145,85	317,06	-	-
650	33,33	153,30	333,25	-	-

Д. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СЕЛЬСИНОВ

Наименование параметра	Обозначение	Тип сельсина		
		Неявнополюсный с демпферной обмоткой	явнополюсный с демпферным контуром	явнополюсный бесконтактный
1	2	3	4	5
Приведенное активное сопротивление обмотки возбуждения	r'_f	$r'_f = \frac{3}{2} \left(\frac{w_\delta k_{i\delta}}{w_f k_{i\delta f}} \right)^2 r_f$	$r'_f = \frac{3}{2} \left(\frac{w_\delta k_{i\delta}}{w_f k_1} \right)^2 r_f,$ где $k_1 = \frac{\sin \frac{a_i \pi}{2}}{0,101 \pi (a_i \pi + \sin a_i \pi)}$	
Приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения	x'_{fs}	$x'_{fs} = \frac{3}{2} \left(\frac{w_\phi k_{o\phi}}{w_f k_{o\phi f}} \right)^2 f_{fs}$	$x'_{fs} = \frac{3}{2} \left(\frac{w_\phi k_{o\phi}}{w_f k_1} \right)^2 f_{fs} + \left(\frac{k_\phi}{k_1} - 1 \right) x_{ad}$ где $k_\phi = \frac{\pi^2 a_i}{8 \sin \frac{a_i \pi}{2}}$	
Приведенное активное сопротивление демпферного контура	r'_e	$r'_e = \frac{3}{2} \left(\frac{w_\delta k_{i\delta}}{w_e k_{i\delta f}} \right)^2 r_e$	$r'_e = \frac{3}{2} \left(\frac{w_\phi k_{o\phi}}{w_\kappa k_2} \right) \frac{r_\kappa}{2}$ где $k_2 = \frac{20 \sin \frac{a_i \pi}{3} \sin \frac{a_i \pi}{6}}{\pi (a_i \pi - \sin a_i \pi)}$	
Приведенное индуктивное сопротивление рассеяния демпферного контура	x'_{ks}	$x'_{ks} = \frac{3}{2} \left(\frac{w_\delta k_{i\delta}}{w_e k_{i\delta k}} \right)^2 x_{ks}$	$x'_{ks} = \frac{3}{2} \left(\frac{w_\phi k_{o\phi}}{w_\kappa k_2} \right)^2 \frac{x_{ks}}{2} + x_{aq} \left(\frac{k_q}{k_2} - 1 \right),$ где $k_q = \frac{\pi^2}{24} \cdot \frac{a_i}{\sin \frac{a_i \pi}{3} \sin \frac{a_i \pi}{6}}$	—
Активное сопротивление фазы синхронизирующей обмотки по продольной оси	r'_d	$r'_d = r_\delta + \frac{x_m'^2 r_f'}{r_f'^2 + (x_m' + x'_{fs})^2}$	$r'_d = r_\delta + \frac{x_{ad}^2 r_f'}{r_f'^2 + (x_{ad} + x'_{fs})^2}$	

Наименование параметра	Обозначение	Тип сельсина		
		невнополюсный с демпферной обмоткой	явнополюсный с демпферным контуром	явнополюсный бесконтактный
1	2	3	4	5
Индуктивное сопротивление фазы синхронизирующей обмотки по продольной оси	x'_d	$x'_d = x_{\phi s} + \frac{x'_m [r'_f{}^2 + x'_{fs} (x'_m + x'_{fs})]}{r'_f{}^2 + (x'_m + x'_{fs})^2}$	$x'_d = x_{\hat{o}s} + \frac{x'_{ad} [r'_f{}^2 + x'_{fs} (x_{ad} + x'_{fs})]}{r'_f{}^2 + (x_{ad} + x'_{fs})^2}$	
Активное сопротивление фазы синхронизирующей обмотки по поперечной оси	r'_q	$r'_q = r_{\hat{o}} + \frac{x_m{}^2 r'_k}{r'_k{}^2 + (x'_m + x'_{ks})^2}$	$r'_q = r_{\hat{o}} + \frac{x_{aq}{}^2 r'_k}{r'_k{}^2 + (x'_{aq} + x'_{ks})^2}$	$r'_q \approx r_{\hat{o}}$
Индуктивное сопротивление фазы синхронизирующей обмотки по поперечной оси	x'_q	$x'_q = x_{\hat{o}s} + \frac{x'_m [r'_k{}^2 + x'_{ks} (x'_m + x'_{ks})]}{r'_k{}^2 + (x'_m + x'_{ks})^2}$	$x'_q = x_{\hat{o}s} + \frac{x'_{aq} [r'_k{}^2 + x'_{ks} (x'_{aq} + x'_{ks})]}{r'_k{}^2 + (x'_{aq} + x'_{ks})^2}$	$x'_q = x_{\hat{o}s} + k x'_{\hat{a}q}$ ($k=0,7 \div 0,8$)

Е. СВОЙСТВА СПЛАВОВ ПРОВОЛОЧНЫХ ТЕНЗОДАТЧИКОВ

Материал	Относительная чувствительность, $\Delta R/R$	Температурный коэффициент сопротивления, $1/^\circ\text{C}$	Удельное сопротивление, $\text{Om}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$	ТермоЭДС в паре с медью, $\text{мкВ}/^\circ\text{C}$	Предел прочности, $\text{H}/\text{м}^2$	Температурный коэффициент линейного расширения, $1/^\circ\text{C}$
Константан (медь, никель)	1,9 ÷ 2,1	$(-5 \div +5) \cdot 10^{-5}$	0,46 ÷ 0,5	47	650	14 ÷ 15
Нихром (никель, хром)	2,0	$(15 \div 17) \cdot 10^{-5}$	0,9 ÷ 1,7	25	-	14
железохромалюминиевый сплав	2,8 ÷ 2,9	$(0,7 \div 2) \cdot 10^{-5}$	1,35 ÷ 1,55	5 ÷ 6	1200	-
Манганин (медь, марганец, никель)	0,47 ÷ 0,5	$(-3 \div +2) \cdot 10^{-5}$	0,4 ÷ 0,45	2	-	16 ÷ 18
Хромель (никель, железо, хром)	2,5	$(10 \div 50) \cdot 10^{-5}$	0,7 ÷ 1,1	16	-	14,8

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдулин С.Ф. Системы автоматики предприятий стройиндустрии. – Омск: СибАДИ, 2007. – 659 с.
2. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2006. – 639 с.
3. Белов М.П. Технические средства автоматизации и управления: учеб. пособие. – СПб.: СЗТУ, 2006. – 184 с.
4. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М.П. Белов, А.Д. Новиков. – 3-е изд. – М.: Академия, 2007. – 576 с.
5. Веппер Л.В., Логвин В.В. Релейно-контакторные системы управления и защиты автоматизированных электроприводов: лабораторный практикум. – Гомель: ГГТУ им П. О. Сухого, 2006. – 61 с.
6. Водовозов А.М. Элементы систем автоматики: учеб. пособие для студ. вузов. – М.: Академия, 2006. – 224 с.
7. Галиев А.Л., Галиева Р.Г. Элементы и устройства автоматизированных систем управления: учеб. пособие. – Sterлитамак: Sterлитамак. гос. пед. акад., 2008. – 220 с.
8. Гольдберг О.Д. и др. Электромеханика: учеб. – М.: Академия, 2007.
9. Системы автоматизированного управления электроприводами: учеб. пособие / Г.И. Гульков, Ю.Н. Петренко, Е.П. Раткевич, О.Л. Симоненкова. – 2-е изд. – Минск: Новое знание, 2007. – 394 с.
10. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов / Г.М. Иванова и др. – М., 2005.
11. Шандров Б.В. Чудаков А.Д. Технические средства автоматизации: учеб. для вузов. – М.: Академия, 2007.
12. Шарапов В.М. Пьезоэлектрические датчики. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
13. Агейкин Д.И. Датчик контроля и регулирования: справочник. – М., 1999. – 520 с.
14. Колосов С.П. Элементы автоматики: учеб. для студентов вузов. – М., 2000. – 392 с.
15. Немцов М.В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. – М., 1999. – 192 с.
16. Подлесный Н.И. Элементы систем автоматического управления и контроля: учеб. – Киев, 1999. – 461 с.
17. Сотсков Б.С. Основы расчета и проектирование электромеханических элементов автоматики и телемеханических устройств. – М., 2005.
18. Пономарев С.Д., Андреева А.А. Расчет упругих элементов машин и приборов. – М., 2000. – 326 с.

Учебное издание

РОГОВА Марина Владимировна

ДАТЧИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Учебное пособие

Редактор Л.А. Скворцова

Компьютерная верстка Н.В. Лукашовой

Подписано в печать 11.05.12

Бум. офсет.

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 4,88 (5,5)

Заказ 162

Формат 60×84 1/16

Уч.-изд. л. 4,8

С 43

Саратовский государственный технический университет

410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Отпечатано в Издательстве СГТУ. 410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Тел. 24-95-70; 99-87-39 e-mail; izdat@sstu.ru